



Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Azcapotzalco

DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
POSGRADO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

ESTUDIO DE PELIGRO SÍSMICO PARA LA CIUDAD
DE OMETEPEC Y OTRAS CIUDADES ALEDAÑAS
DEL ESTADO DE GUERREO

TESIS

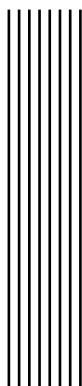
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL
PRESENTA

ELIANA INCA CABRERA

DIRECTOR DE TESIS: **DR. HUGÓN JUÁREZ GARCÍA**

MÉXICO, D. F.

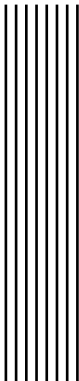
JULIO DE 2013



Créditos Institucionales

Esta tesis fue elaborada en el Área de Estructuras de la Unidad Azcapotzalco de la Universidad Autónoma Metropolitana, bajo la dirección del Doctor Hugón Juárez García. Durante la realización de este trabajo, la autora recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT-415578).

*A mis padres: Elisa y Victor
Por su apoyo incondicional.*



Agradecimientos

A todos los que la presente vieron y entendieron.

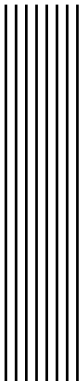
Inicio de las Leyes Orgánicas. Juan Carlos I

AGRADEZCO a mi tutor, Dr. Hugón Juárez García por su confianza, amistad, guía e interminable paciencia; a la orientación y asesoría académica brindada por los revisores de esta tesis, Dr. José Luis Rangel Núñez y Dr. Jorge Aguirre González, que dedicaron tiempo y atención a la revisión de este trabajo permitiendo enriquecer su contenido.

Agradezco, de manera especial, a todos los maestros del Posgrado en Ingeniería Estructural de la UAM-Azcapotzalco, por su valioso tiempo, conocimientos y experiencia transmitida. Yo les prometo honrar su labor con la misma generosidad y entrega.

A la Universidad Autónoma Metropolitana, por mantener sus puertas siempre abiertas al conocimiento y por apoyarme en tan enriquecedora experiencia; al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por su apoyo y confianza como becaria de la institución; a México, hermoso país que me ha acogido en estos años de estudio, llenándome de grandiosas experiencias.

Por último y no menos importante, agradezco a mis padres Elisa Cabrera García y Victor Inca Cachi, personas formidables que han permitido, con su ejemplo y entrega, mi formación como persona y profesional, gracias por su confianza. Todo esto no pudo ser posible sin la gracia de Dios, que guía mi camino, todo lo presentado aquí, no es por mi, sino, por voluntad suya.



Resumen

*Desocupado lector, sin juramento me podrás creer
que quisiera que este libro [...] fuera el más
hermoso, el más gallardo y más discreto que
pudiera imaginarse.*

Miguel de Cervantes, Don Quijote de la Mancha

LA capacidad destructiva de los eventos sísmicos justifican de por sí, los estudios encaminados a la prevención y mitigación de sus efectos, es así, que debido a la cercanía de las fuentes sísmicas y el potencial destructivo de los sismos ocurridos en el estado de Guerrero, y por la escasa investigación en regiones como Ometepec, se justifica el estudio aquí presentado; el objetivo principal consiste en realizar el estudio de Peligro Sísmico principalmente para la ciudad de Ometepec, Guerrero; e incluir el estudio para ciudades aledañas, permitiendo aplicar el Método de Ponderación de Distancia Inversa para obtener nuevos parámetros sísmicos a partir de Espectros de Peligro Uniforme (EPU) para el segmento Ometepec, y de esta manera generar una malla de puntos con EPU conocidos, de manera que la metodología pueda ser utilizada y ampliada para encontrar EPU en todo el territorio mexicano y sea un herramienta útil para los ingenieros de la práctica.

Se identifican y caracterizan las fuentes sísmicas generadoras de peligro sísmico para Ometepec, considerando el estado de arte nacional e internacional en relación con los estudios de sismología e ingeniería sísmica en la región, empleando 9 fuentes tipo falla y 5 fuentes tipo área definidas por modelos finitos; toda esta información es presentada en el capítulo 3, junto con el catálogo sísmico recopilado para la región. Posteriormente, se realiza una descripción cualitativa de la geología y topografía del municipio de Ometepec, encontrando que a diferencia de ciudades aledañas, su relieve es más bien suave, con elevaciones promedio de 300 msnm y cadenas montañosas que alcanzan hasta los 1000 msnm en los alrededores; el relieve del terreno se pudo entender mejor al observar un Modelo de Elevación del Terreno (MDE) presentado en el capítulo 4. En el capítulo 5, se estudian las relaciones de atenuación del movimiento fuerte del suelo que describen las aceleraciones espectrales para terreno

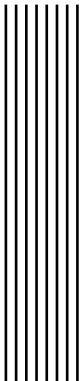
firme y las aceleraciones máximas de terreno, para su selección se recurre a las relaciones de atenuación existentes en la literatura actual para la región de estudio. No se desarrollaron ecuaciones de relaciones de atenuación particulares para el sitio. Sin embargo, todas las utilizadas en este trabajo contienen en sus catálogos de sismicidad, los eventos sísmicos más representativos de la zona. Se trabaja con cinco relaciones de atenuación, dos de ellas desarrolladas a nivel global Youngs *et al.* (1997) (Y97) y Atkinson y Boore (2003) (AYB03), y tres de ellas generadas para eventos de subducción de la costa del Pacífico García *et al.* (2005) (GA05), Arroyo *et al.* (2010) (ARR10) y Gómez-Bernal *et al.* (2012) (GO12). Se observa que las relaciones de atenuación de Youngs *et al.* (1997) y Atkinson y Boore (2003) permiten calcular Espectros de Peligro Uniforme (EPU) para Ometepec que empatan mejor con la reglamentación vigente, pudiendo afirmar que la ecuación de atenuación de Youngs *et al.* (1997) puede utilizarse para calcular los EPU para Ometepec y ciudades aledañas, obteniendo resultados confiables, mientras que la ecuación de Atkinson y Boore (2003) permite obtener las aceleraciones pico del terreno mas acertadas y conforme a los reglamentos estudiados (CFE, 2008; RCMO, 2009).

En el capítulo 6, se realiza el análisis de peligro sísmico con el enfoque probabilista, se obtienen curvas de peligro sísmico y espectros de peligro uniforme para las diferentes relaciones de atenuación, considerando tres casos de estudio para la definición de fuentes sísmicas, con radios de influencia desde Ometepec a 200 km, 320 km y 500 km; encontrándose que el caso con 500 km de radio presenta una sobre-posición de efectos con los casos con 320 km y 200 km, y este último llega a subestimar los parámetros sísmicos; por lo que, un radio de influencia de fuentes sísmicas de 320 km con centro en la ciudad de Ometepec, es suficiente para incluir las fuentes sísmicas mas importantes que afectan a la región. Los EPU para Ometepec que deben utilizarse para análisis sísmicos de estructuras, son los calculados con la relación de atenuación de Youngs *et al.* (1997), entendiéndose que los periodos de retorno de 20 años, 45 años y 100 años deben ser utilizados para estructuras del Grupo B y corresponden a eventos sísmicos leves a moderados; mientras que para estructuras del Grupo A, se debe utilizar el EPU para un periodo de retorno de 475 años, que corresponde a un evento sísmico severo, y para estructuras especiales donde se requiera un nivel sísmico extraordinario se puede recurrir a los EPU calculados para periodos de retorno de 975 años y 2475 años. La elección de EPU depende del nivel de peligro sísmico que se desea aceptar, los objetivos de diseño y el nivel de desempeño sísmico para la estructura en estudio.

Posteriormente, con el objetivo de obtener nuevos parámetros sísmicos para el segmento Ometepec y plantear una malla de puntos con EPU conocidos, se realiza la interpolación de EPU con una metodología alternativa a las existentes, conocida como Método de Ponderación de la Distancia Inversa (IDW, por sus siglas en inglés) desarrollada por Shepard (1968). Se desarrollaron tres modelos de estudio calculando los EPU para cada punto de interpolación en cada modelo, utilizando dos relaciones de atenuación (Y97 y AYB03), de los que se observa que las mejores interpolaciones de EPU se realizan con distancias de puntos $\leq 30\text{km}$, utilizando 5 puntos como mínimo, obteniéndose diferencias porcentuales menores a 6 %; a diferencia del tercer modelo con puntos de interpolación entre 50 y 70 km, cuyas diferencias llegan hasta aproximadamente 9 %, en muchos casos sobre-estimando las aceleraciones es-

pectrales.

Finalmente, con un análisis determinista y utilizando la metodología de desagregación del peligro sísmico en función de la magnitud sísmica y la distancia a la fuente, se seleccionan acelerogramas semilla, que se utilizan en la técnica de Ajuste de Espectros (*Spectral Matching*) en el tiempo mediante la adhesión de funciones Wavelet que modifican los acelerogramas iniciales de tal manera que sus espectros de respuesta lleguen a empatar con los EPU calculados para Ometepec, técnica desarrollada por Al Atik y Abrahamson (2010). Se obtuvieron siete acelerogramas de sitio para suelo firme de Ometepec, los cuales se presentan en el apéndice E, tres de estos acelerogramas deben ser utilizados para el análisis sísmico en el tiempo de estructuras pertenecientes al Grupo A, ya que sus espectros de respuesta de aceleración fueron ajustados a EPU que corresponden a periodos de retorno de 475 años, los cuatro acelerogramas de sitio restantes corresponden a estructuras del Grupo B, con espectros de respuesta de aceleración ajustados a EPU para periodos de retorno de 45 años.



Abstract

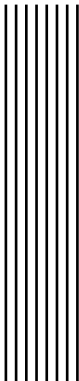
THE well-known destructive capacity of earthquakes around the world, justifies by itself every study made for prevention and mitigation of earthquake effects; therefore, this study is justified because the Guerrero state is located near important seismic faults in a high seismic active region. The earthquakes in the area have caused significant destruction, and there is a lack of investigation in cities like Ometepec. The main objective of this research is to develop a seismic hazard assessment for Ometepec, and include some near cities, allowing the application of the Inverse Distance Weight method (IDW, Sheppard methodology) for the Uniform Hazard Spectra (UHS) obtained in the area, and produce new seismic parameters for the entire Ometepec segment at the Guerrero State in Mexico, by this process, create a grid of points with UHS known, and use this example to extent the data to all the Mexican territory using this as an important tool for the structural engineers.

The selection and characterization of seismic sources are defined by using seismological and engineering studies for the region, nine fault sources and five area sources, defined by finite models are used in this study, this information, along with a historical seismic catalog for the region, is shown in chapter 3. In chapter 4 is shown a qualitative description of geological and topographical characteristics of Ometepec, the topography in the area is gentle to moderate, with elevations ranging from about 300 meters to over 1000 meters in the mountains around the city, a Digital Elevation Model allows a better understanding of the topography, which is also shown in the chapter. The strong ground motion attenuation relationships (GMRA), selected from reports of the existing literature developed in Mexico and the world, are described in chapter 5. Strong ground-motion relations for horizontal components of pseudo-acceleration response spectra, and peak ground acceleration for interface and intraslab earthquakes at rock sites are define. In this study it is not considerate the development of new attenuation relationships, but all the selected are defined by important seismic events occurred in the Guerrero region, derived from regional and worldwide databases. The five GMRA are: Youngs *et al.* (1997) (Y97) y Atkinson y Boore (2003) (AYB03), developed with a global scope and García *et al.* (2005)(GA05), Arroyo *et al.* (2010) (ARR10) y

Gómez-Bernal *et al.* (2012) (GO12), developed for the Mexican subduction zone. Is possible to assure that the Y97 and AYB03 GMRA aloud the calculation of UHS that matches better with the actual design codes for Ometepe; the GMAT of Y97 is the best to obtain trustable UHS for Ometepe and near cities, and the AYB03 aloud to obtain Peak Ground Accelerations in accordance with the design codes (RCMO, 2009; CFE, 2008).

The results from the probabilistic seismic hazard assessment for Ometepe and near cities are shown in chapter 6, this results are presented as Seismic hazard curves and Uniform Hazard Spectra (UHS) obtained for the different GMRA, for this purpose are considered 3 areas where earthquakes might occur, with radii: 200, 320 and 500 km, these areas are select according to the influence of the seismic sources. The results show that the model with radius of 500 km is overlapped with the 320 km and 200 km radii, this last one underestimates the UHS values; therefore, the radius of 320 km is enough to include the most important faults and areas that affect Ometepe and to produce significant UHS for the region. The UHS for seismic analysis and design of structures for Ometepe, are the ones calculate with de GMRA of Y97. For structures classified as part of the Group B, the UHS would be the ones calculate for 20 years, 45 years and 100 years; for structures classified as part as the Group A, the UHS is the one with the return period of 475 years and for special structures, that require an extraordinary earthquake hazard, the UHS for 975 years and the 2475 yeas could be used.

Later, an interpolation of UHS using the Sheppard methodology - Inverse Distance Weight method (IDW), (Shepard (1968)) is present. Three cases are studied, and a UHS is calculate for every interpolation point, using two GMAR in each model (Y97 y AYB03), allowing to observe that the best results are obtained with distance between interpolation points of ≤ 30 km, and using a minimum of 5 points, with perceptual errors less than 6 %; in the third model, with distance between interpolation points around 50 km to 70 km, the errors are near to 9 %, with many cases where the Spectral Accelerations of the UHS are overestimate. Finally, with a deterministic analysis and using a disaggregation of output from the Probabilistic Seismic Hazard Analysis, are select seed acceleration time history functions, which are used in the time domain Spectral Matching methodology, by adding Wavelets functions to modify the initial time series such that its response spectrum is compatible with the design spectrum, developed by Al Atik y Abrahamson (2010). Seven time history acceleration functions for rock are obtain, all of these shown in appendix E, three of these functions are to use in dynamic seismic analysis of structures classified as Group A, because their acceleration response spectrum is match with de UHS for a return period of 475 years, and the other four time history functions for Ometepe are to be used for structures in Group B, because their acceleration response spectrum is matched with de UHS for a return period of 45 years.

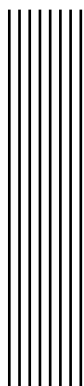


Índice general

Agradecimientos	VII
Resumen	XI
Abstract	XIII
Índice general	XV
Índice de figuras	XX
Índice de tablas	XXIII
1. Introducción y Objetivos	1
1.1. Introducción	1
1.2. Antecedentes	2
1.3. Justificación	4
1.4. Objetivos	5
1.4.1. Objetivo general	5
1.4.2. Objetivos específicos	5
1.5. Alcances	6
2. Métodos de Análisis de Peligro Sísmico	8
2.1. Enfoque Determinista para la evaluación de peligro sísmico	9
2.2. Enfoque Probabilista para la evaluación de peligro sísmico	10
2.2.1. Primera etapa: Identificación y caracterización de las fuentes sísmicas	11
2.2.2. Segunda etapa: Establecer las relaciones de recurrencia	12
2.2.3. Tercera etapa: Definición de relaciones predictivas	12
2.2.4. Cuarta etapa: Distribución de probabilidad del movimiento	14
2.3. Discusión sobre metodologías y decisiones sobre mitigación de efectos sísmicos	16

2.4.	Metodología utilizada para la obtención de Espectros de Peligro Uniforme (EPU)	17
2.4.1.	Metodología de Interpolación de Espectros de Peligro Uniforme	19
2.5.	Obtención de acelerogramas a partir de Espectros de Peligro Uniforme (EPU)	20
2.5.1.	Desagregación	24
2.5.2.	Metodologías para escalar Acelerogramas	25
3.	Caracterización de las Fuentes sismogénicas para la ciudad de Ometepec, Guerrero	30
3.1.	Catálogo de sismicidad regional	30
3.2.	Sismicidad local	35
3.3.	Potencial sísmico	35
3.4.	Caracterización de las Fuentes sismogénicas	42
3.4.1.	Fuentes tipo Falla para la región de Ometepec, Guerrero	42
3.4.2.	Fuentes tipo Área para la región de Ometepec, Guerrero	43
4.	Descripción de condiciones geológicas y geotécnicas	50
4.1.	Descripción local	52
4.2.	Características topográficas del terreno	55
5.	Relaciones de atenuación del Movimiento Fuerte del suelo	57
5.1.	Antecedentes	57
5.2.	Definición de modelos de atenuación	58
5.3.	Relaciones de atenuación del movimiento fuerte del suelo en el programa EZ-FRISK TM	65
6.	Análisis de Peligro sísmico	67
6.1.	Caso de aplicación: ciudad de Ometepec, Guerrero	67
6.2.	Espectros de diseño	78
6.3.	Interpolación IDW	86
6.3.1.	Modelo 1: Puntos de interpolación a distancias menores de 15 km	86
6.3.2.	Modelo 2: Puntos de interpolación a distancias menores de 30 km	94
6.3.3.	Modelo 3: Puntos de interpolación a distancias menores de 70 km	102
6.4.	Obtención de acelerogramas de sitio	109
6.4.1.	Desagregación del Peligro sísmico	112
6.4.2.	Ajuste de Espectros mediante la técnica de Wavelets en el tiempo	118
6.5.	Resumen de resultados	124
7.	Conclusiones	133
7.1.	Contribuciones	133
7.2.	Conclusiones generales	134
7.3.	Trabajos futuros	139
	Bibliografía	141

A. Probabilidad de excedencia	149
B. Método de Ponderación de Distancia Inversa (IDW) de Shepard (1968)	153
C. Regionalización Sísmica según Zúñiga (1997)	156
D. Descripción del programa EZ-FRISK TM	158
D.1. Descripción general	158
D.2. Principales módulos	158
D.3. Datos	160
D.4. Resultados	166
E. Acelerogramas de sitio mediante la técnica del Ajuste de Espectros	168
E.1. Desagregación del peligro sísmico	168
E.2. Acelerogramas de diseño	170
E.2.1. Acelerogramas semilla	170
E.2.2. Acelerogramas resultado del Ajuste de Espectros	172
E.2.3. Espectros de Fourier de los acelerogramas obtenidos	173
E.2.4. Curvas de porcentaje de intensidad de Arias	174
E.2.5. Comparación de EPU obtenidos con la técnica del Ajuste de Espectros (Spectral Matching) y espectros de eventos semilla	176
F. Ejemplo de cálculo de un Espectro condicional promedio (CMS-ϵ)	178



Índice de figuras

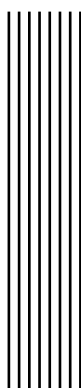
1.1. Placas tectónicas que interactúan en territorio mexicano.	4
2.1. Obtención de las ordenadas espectrales de los EPU (der.) a partir de las curvas de peligro sísmico (izq).	18
2.2. Ejemplo de Espectro de Peligro Uniforme (EPU) para la ciudad de Ometepec, Guerrero. Calculado para probabilidad de 2 %, 5 % y 10 % en 50 años. . . .	18
2.3. Registros acelerográficos para tres canales del sismo del 14 de Septiembre de 1995, registrada por la estación COPL (Copala) del Instituto de Ingeniería, UNAM.	23
2.4. Ejemplo de desagregación del peligro sísmico para un periodo espectral de 0.2 s y amplitud espectral de 1.15 g	25
3.1. Placas tectónicas de la República Mexicana (Nava, 1987).	31
3.2. Sismos moderados y grandes en México, el catalogo del siglo XX (Kostoglodov y Pacheco, 1999).	32
3.3. Estructura de la zona de Subducción y localización de sismos. Para los Estados de Guerrero y Oaxaca (Kostoglodov V. y Pacheco J. F., 1999). . . .	33
3.4. Cambios en la placa de cocos en la que se puede observar la ubicación de sismos de falla normal e intraplaca, Guerrero - Cd. de México (Jaimes y Reinoso, 2001).	34
3.5. Segmentos de ruptura en la zona de subducción mexicana.	39
3.6. Segmentos de falla que generan peligro sísmico en Ometepec.	42
3.7. Fuentes tipo área que se estudiaron para el peligro sísmico de Ometepec. . .	44
3.8. Zonas sismo-tectónicas intraplaca.	45
3.9. Zona 8, epicentros de sismos en el periodo 1928-1995 (Núñez-Cornú, 1996). .	48
3.10. Epicentros de sismos importantes para la Región Ometepec $M > 6.5$	49

4.1. Izq.: Estado de Guerrero y ubicación del Municipio de Ometepec; Der.: Regiones topomorfas del Municipio de Ometepec (modificado del Portal Interactivo, Estadístico y Geográfico de Guerrero; http://www.campoguerrero.gob.mx/siggro/alov/mpios/ometepec/index.html).	52
4.2. Distribución de tipos de roca, brechas y cuerpos de agua en el municipio de Ometepec (modificado del Portal Interactivo, Estadístico y Geográfico de Guerrero; http://www.campoguerrero.gob.mx/siggro/alov/mpios/ometepec/index.html).	54
4.3. Modelo de Elevación del Terreno realizado para el sector Sur-Este del estado de Guerrero (Fuente: INEGI).	55
4.4. Curvas de nivel y dos cortes transversales que indican la posición de la ciudad de Ometepec en la parte más baja del valle.	56
6.1. Espectros de Peligro Uniforme para Ometepec utilizando la relación de atenuación de Youngs <i>et al.</i> (1997).	69
6.2. Espectros de Peligro Uniforme para Ometepec utilizando la relación de atenuación de Atkinson y Boore (2003).	70
6.3. Espectros de Peligro Uniforme para Ometepec utilizando la relación de atenuación de García <i>et al.</i> (2005).	71
6.4. Espectros de Peligro Uniforme para Ometepec con la relación de atenuación de Arroyo <i>et al.</i> (2010).	72
6.5. EPU para Ometepec, para cuatro relaciones de atenuación, $Tr = 20$ años y el modelo de fuentes sísmicas $r = 500$ km.	72
6.6. EPU ara Ometepec, para cuatro relaciones de atenuación con $Tr=45$ años y $r=320$ km.	73
6.7. EPU para Ometepec, utilizando cuatro relaciones de atenuación para $Tr=100$ años y $r=200$ km.	73
6.8. EPU para Ometepec, estudiando las fallas de tipo intraplaca para tres ecuaciones de atenuación, con $Tr=100$ años y $r=320$ km.	74
6.9. EPU para Ometepec, estudiando las fallas de tipo interplaca, para tres ecuaciones de atenuación con $Tr=100$ años y $r=320$ km.	75
6.10. Gráfica de peligro para $T=0.2$ s y $r=320$ km. Fuentes sísmicas tipo falla.	75
6.11. Gráfica de peligro para $T=0.2$ s y $r=320$ km. Fuentes sísmicas tipo área.	76
6.12. Gráfica de peligro para $T=0.3$ s y $r=500$ km. Fuentes sísmicas tipo área.	77
6.13. Recurrencia de las fuentes sísmicas consideradas en el estudio. Caso de estudio: $r=500$ km.	77
6.14. Espectros de diseño calculados con PRODISIS, comparados con los EPU para Ometepec con Y97 y los coeficientes sísmicos del RCMO (2009).	79
6.15. Espectros de diseño calculados con PRODISIS, comparados con los EPU para Ometepec con AYB03 y los coeficientes sísmicos del RCMO (2009).	81
6.16. Espectros de diseño calculados con PRODISIS, comparados con los EPU para Ometepec con GA05 y los coeficientes sísmicos del RCMO (2009).	82
6.17. Espectros de diseño calculados con PRODISIS, comparados con los EPU para Ometepec con ARR10 y los coeficientes sísmicos del RCMO (2009).	84

6.18. Ubicación de los puntos de interpolación para el modelo 1.	87
6.19. EPU interpolados para diferentes valores de p en comparación con el EPU calculado, para periodos menores a 0.4 s con Y97.	91
6.20. EPU calculado e interpolaciones con $4 \leq p \leq 9$, para Y97.	91
6.21. EPU interpolados para diferentes valores de p en comparación con el EPU calculado, para periodos menores a 0.4 s. con AYB03.	93
6.22. EPU calculado e interpolaciones con $2 \leq p \leq 5$, para AYB03.	94
6.23. Ubicación de los puntos de interpolación para el modelo 2.	95
6.24. EPU interpolados para diferentes valores de p en comparación con EPU calculado para Ometepepec, para periodos menores a 0.4 s con Y97.	98
6.25. EPU calculado e interpolaciones con $2 \leq p \leq 5$, para Y97.	99
6.26. EPU interpolados para diferentes valores de p en comparación con EPU calculado para Ometepepec, en un intervalo de periodos menores a 0.4 s, con AYB03.	101
6.27. EPU calculado e interpolaciones con $5 \leq p \leq 9$, para AYB03.	101
6.28. Ubicación de los puntos de interpolación para el modelo 3.	102
6.29. EPU interpolados para diferentes valores de p en comparación con el EPU calculado, para periodos menores a 0.4 s con Y97.	106
6.30. EPU calculado e interpolaciones con $2 \leq p \leq 5$, para Y97.	106
6.31. EPU interpolados para diferentes valores de p en comparación con el EPU calculado, para periodos menores a 0.5 s con AYB03	108
6.32. EPU calculado e interpolaciones con $4 \leq p \leq 9$, para AYB03	109
6.33. Comparación entre el EPU obtenido con la relación de atenuación de Youngs <i>et al.</i> (1997) para $T_r=475$ años y el CMS para 2.3 g.	111
6.34. Comparación entre el EPU, CMS, y el espectro de aceleración estimado con la relación de atenuación de Y97 para $M=7.8$, $R=11.8$ km.	112
6.35. DPS - M y R, para el modelo 2 ($r=320$ km) con la relación de atenuación de Y97, para $SA(0.2\text{ s}) \geq 0.84g$, para $T_r=45$ años (Izq.) y $T_r=475$ años (Der.)	114
6.36. DPS - M y R, para el modelo 2 ($r=320$ km) con la relación de atenuación de AYB03, para $SA(0.4\text{ s}) \geq 0.42g$, para $T_r=45$ años (Izq.) y $T_r=475$ años (Der.)	114
6.37. Ubicación de los dos eventos sísmicos estudiados.	117
6.38. Espectros de pseudo-aceleración de los acelerogramas semilla y EPU, $T_r=45$ años	120
6.39. Espectros de pseudo-aceleración de los acelerogramas semilla y EPU, $T_r=475$ años	121
6.40. EPU para AYB03, $T_r=475$ años y el espectro del registro VI95 S90°E.	121
6.41. Convergencia (misfit) entre EPU calculado para AYB03 para $T_r=475$ años y el espectro de aceleración del evento VI95 S90°E.	122
6.42. Componentes de aceleración, velocidad y desplazamiento del evento inicial VI95 S90°E y el empatado al EPU.	123
6.43. Espectros de Fourier para el acelerograma semilla VI95 S90°E (izquierda) y el resultado del SM para el EPU con $T_r=475$ años AYB03 (derecha).	124
6.44. Incremento de % de intensidad de Arias para el acelerograma semilla VI95 S90°E (superior) y el resultado del SM para el EPU con $T_r=475$ años AYB03	124

6.45. EPU para Y97 y espectros de diseño del MDOC, CFE (2008)	125
6.46. EPU para AYB03 y espectros de diseño del MDOC, CFE (2008)	125
6.47. EPU para GA05 y espectros de diseño del MDOC, CFE (2008)	126
6.48. EPU para ARR10 y espectros de diseño del MDOC, CFE (2008)	126
6.49. Espectros de pseudo-aceleración de los eventos semilla y EPU, Tr=45 años .	127
6.50. Espectros de pseudo-aceleración de los eventos semilla y EPU, Tr=475 años	128
6.51. Ubicación de los puntos de interpolación utilizados para los modelos del método de interpolación de la distancia inversa (IDW), Shepard (1968). . .	130
6.52. Espectros de Peligro uniforme propuestos para Ometepe, considerando diferentes niveles de desempeño sísmico.	131
6.53. Acelerogramas de sitio para suelo firme, obtenidos para estructuras del grupo B.	132
6.54. Acelerogramas de sitio para suelo firme, obtenidos para estructuras del grupo A.	132
D.1. Pantalla principal del programa EZ-FRISK™ v 7.62	159
D.2. Datos introducidos para el análisis de Peligro Sísmico	160
D.3. Fuentes sísmicas para México	161
D.4. Geometría de fallas	162
D.5. Geometría de fallas	163
D.6. Leyes de atenuación para diferentes regiones del mundo	164
D.7. Introducción de una relación de atenuación mediante código.	165
D.8. Parámetros de la relación de atenuación definida mediante código.	165
D.9. Introducción de una relación de atenuación mediante base de datos (formato de tabular).	166
E.1. Desagregación para Tr=45años (Izq.) y Tr=475años (Der.), con Y97.	168
E.2. Desagregación para Tr=45 años (Izq.) y Tr=475 años (Der.), con AYB03. . .	169
E.3. Desagregación para Tr=45 años (Izq.) y Tr=475 años (Der.), con GA05 . . .	169
E.4. Desagregación para Tr=45 años (Izq.) y Tr=475 años (Der.), con ARR10 . .	170
E.5. Acelerograma, porcentaje de intensidad de Arias y espectro de Fourier del evento semilla del 24-Oct-1993, registrado en la estación Copala dirección N90°E	170
E.6. Acelerograma, porcentaje de intensidad de Arias y espectro de Fourier del evento semilla del 24-Oct-1993, registrado en la estación Las Vigas dirección S90°E	171
E.7. Acelerograma, porcentaje de intensidad de Arias y espectro de Fourier del evento semilla del 14-Sep-1995, registrado en la estación Las Vigas dirección S0°E	171
E.8. Acelerograma, porcentaje de intensidad de Arias y espectro de Fourier del evento semilla del 14-Sep-1995, registrado en la estación Las Vigas dirección S90°E	171
E.9. Acelerograma resultado del ajuste del EPU de Y97 con el espectro del evento CO93-N90°E, para Tr=45 años.	172

E.10. Acelerogramas resultado del ajuste del EPU de Y97 con el espectro del evento VI93-S90°E, para Tr=45 años (izq.) y Tr=475 años (der.).	172
E.11. Acelerograma resultado del ajuste del EPU de AYB03 con el espectro del evento VI95-S0°E, para Tr=45 años (izq.) y Tr=475 años (der.).	172
E.12. Acelerograma resultado del ajuste del EPU de AYB03 con el espectro del evento VI95-S90°E, para Tr=45 años (izq.) y Tr=475 años (der.).	173
E.13. Espectros de Fourier de los acelerogramas resultado del ajuste del EPU de Y97 con el espectro del evento CO93-N90°E, para Tr=45 años.	173
E.14. Espectros de Fourier de los acelerogramas resultado del ajuste del EPU de Y97 con el espectro del evento VI93-S90°E, para Tr=45 años (izq.) y Tr=475 años (der.).	173
E.15. Espectros de Fourier de los acelerogramas resultado del ajuste del EPU de AYB03 con el espectro del evento VI95-S0°E, para Tr=45 años (izq.) y Tr=475 años (der.).	174
E.16. Espectros de Fourier de los acelerogramas resultado del ajuste del EPU de AYB03 con el espectro del evento VI95-S90°E, para Tr=45 años (izq.) y Tr=475 años (der.).	174
E.17. Porcentaje de intensidad de Arias para los acelerogramas resultado del ajuste del EPU de Y97 con el espectro del evento CO93-N90°E, para Tr=45 años. .	174
E.18. Porcentaje de intensidad de Arias para los acelerogramas resultado del ajuste del EPU de Y97 con el espectro del evento VI93-S90°E, para Tr=45 años (izq.) y Tr=475 años (der.).	175
E.19. Porcentaje de intensidad de Arias para los acelerogramas resultado del ajuste del EPU de AYB03 con el espectro del evento VI95-S0°E, para Tr=45 años (izq.) y Tr=475 años (der.).	175
E.20. Porcentaje de intensidad de Arias para los acelerogramas resultado del ajuste del EPU de AYB03 con el espectro del evento VI95-S90°E, para Tr=45 años (izq.) y Tr=475 años (der.).	175
E.21. Espectro ajustado del evento CO93_ N90°E con el EPU de Y97 para Tr=45 años.	176
E.22. Espectro ajustado del evento VI93_ S90°E con el EPU de Y97 para Tr=45 años.	176
E.23. Espectro ajustado del evento VI93_ S90°E con el EPU de Y97 para Tr=475 años.	176
E.24. Espectro ajustado del evento VI95_ S0°E con el EPU de AYB03 para Tr=45 años.	177
E.25. Espectro ajustado del evento VI95_ S0°E con el EPU de AYB03 para Tr=475 años.	177
E.26. Espectro ajustado del evento VI95_ S90°E con el EPU de AYB03 para Tr=45 años.	177
E.27. Espectro ajustado del evento VI95_ S90°E con el EPU de AYB03 para Tr=475 años.	177
F.1. Graficas del CMS- ϵ , EPU (Tr=475 años) y la ec. Atenuación Y97	181



Índice de tablas

2.1. Comparación entre metodologías; McGuire, 2001	16
3.1. Catálogo de sismicidad histórico. Los catálogos corresponden a información obtenida de la USGS. NGDC: National Geophysical Data Center. NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration. PDE: Preliminary Determination of Epicenters. Referencias (1):Hora GMT. (2): Información obtenida de Singh L. Astiz y J. Havskov (1981); Kostoglodov y Pachecho (1999). (3): González-Ruiz J.R. y McNally K.C. (1988); Nuñez Conrú F. J. (1996). (4): Sordo y otros (1995). (5): Juárez y otros (2012). (6): Figueroa (1970). Las referencias (2) a (6) utilizaron información del Servicio Sismológico Nacional para la localización de sismos.	37
3.2. Ubicación de las fallas sísmicas	41
3.3. Caracterización de las fallas sísmicas	41
3.4. Parámetros de las fuentes sísmicas tipo área.	47
6.1. Parámetros utilizados para el Peligro Sísmico de Ometepe	68
6.2. Coeficientes de diseño sísmico para Ometepe.	79
6.3. Comparación de PGA de EPU con Y97 y espectros de diseño del MDOC.	80
6.4. Comparación de PGA de EPU con AYB03 y espectros de diseño del MDOC.	81
6.5. Comparación de PGA de EPU con GA05 y espectros de diseño del MDOC.	83
6.6. Comparación de PGA de EPU con ARR10 y espectros de diseño del MDOC.	85
6.7. Comparación de PGA con las diferentes ecuaciones de atenuación.	85
6.8. Comparación de PGA obtenidas según el MDOC (CFE, 2008) y el RCMO.	85
6.9. Ubicación de los cuatro puntos donde se obtendrán los EPU en la región.	88
6.10. Modelos para obtener EPU en cuatro puntos de la región	88
6.11. EPU para cada sitio utilizando Y97 y AYB03.	88
6.12. Pesos asignados a cada punto con $p=3$	89
6.13. Interpolación del EPU para Ometepe con cuatro puntos, para valores de p de 2 a 5, para la relación de atenuación de Youngs <i>et al.</i> (1997).	89

6.14. Interpolación del EPU para Ometepec con cuatro puntos, para valores de p de 6 a 9, para la relación de atenuación de Youngs <i>et al.</i> (1997).	90
6.15. Interpolación del EPU para Ometepec con cuatro puntos, para valores de p de 2 a 4, para la relación de atenuación de Atkinson y Boore (2003).	92
6.16. Interpolación del EPU para Ometepec con cuatro puntos, para valores de p de 5 a 9, para la relación de atenuación de Atkinson y Boore (2003).	93
6.17. Ubicación de los 5 puntos donde se obtendrán los EPU en la región.	95
6.18. Modelos para obtener EPU en 5 puntos de la región.	95
6.19. EPU para cada sitio con Y97 y AYB03	96
6.20. Pesos asignados a cada punto con $p=5$	96
6.21. Interpolación del EPU para Ometepec con 5 puntos, para valores de p de 2 a 4, con la relación de atenuación de Youngs <i>et al.</i> (1997).	97
6.22. Interpolación del EPU para Ometepec con 5 puntos, para valores de p de 5 a 9, para la relación de atenuación de Youngs <i>et al.</i> (1997).	97
6.23. Interpolación del EPU para Ometepec con 5 puntos, para valores de p de 2 a 4, para la relación de atenuación de Atkinson y Boore (2003).	99
6.24. Interpolación del EPU para Ometepec con 5 puntos, para valores de p de 5 a 9, para la relación de atenuación de Atkinson y Boore (2003).	100
6.25. Ubicación de los 4 puntos donde se obtendrán los EPU en la región	103
6.26. Modelos para obtener EPU en 4 puntos de la región	103
6.27. EPU para cada sitio utilizando Y97 y AYB03.	103
6.28. Pesos asignados a cada punto con $p=5$	104
6.29. Interpolación del EPU para Ometepec con cuatro puntos, para valores de p de 2 a 4 y la relación de atenuación de Youngs <i>et al.</i> (1997)	104
6.30. Interpolación del EPU para Ometepec con cuatro puntos, para valores de p de 5 a 9, para la relación de atenuación de Youngs <i>et al.</i> (1997).	105
6.31. Interpolación del EPU para Ometepec con 4 puntos, para valores de p de 2 a 4 y la relación de atenuación de Atkinson y Boore (2003).	107
6.32. Interpolación del EPU para Ometepec con 4 puntos, para valores de p de 5 a 9, para la relación de atenuación de Atkinson y Boore (2003).	107
6.33. Parámetros utilizados para la desagregación de M-R y ϵ	113
6.34. Parámetros de los registros sísmicos semilla	117
6.35. Ubicación de los registros sísmicos semilla	118
6.36. Comparación de PGA con las diferentes ecuaciones de atenuación.	127
6.37. Parámetros de cada punto de interpolación.	129
6.38. Valores de SA(g) de los EPU calculados con la ecuación de Y97.	129
6.39. Valores de SA(g) de los EPU calculados con la ecuación de AYB03.	130
 B.1. Ubicación de sitios de estudio	 153
B.2. Cálculo del factor de ponderación de distancia inversa para un $p=4$	154
B.3. Interpolación de aceleraciones espectrales para 5 fuentes, utilizando $p=4$	155
 F.1. Valores de SA(g) y EPU ($T_r=475$ años) calculados con Y97 para diferentes periodos.	 179
F.2. Valores del factor de correlación, según Baker y Jayaram (2008).	180

F.3. Valores calculados para el CMS- ϵ	182
---	-----



1 Introducción y Objetivos

*Antes y por encima de todo cálculo está la idea,
moldeadora del material en forma resistente, para
cumplir su misión.*

Eduardo Torroja Miret

1.1. Introducción

México se encuentra en una de las regiones de más alta actividad sísmica en el mundo, y por ello está expuesto a sismos fuertes que provocan pérdida de vidas y destrucción material. Es por esto que se deben realizar estudios de peligro sísmico en toda la República Mexicana, para que sea posible planificar y mitigar los efectos de futuros eventos sísmicos. Los estudios de peligro sísmico permiten estimar de forma aproximada la probabilidad con que un evento sísmico ocurrirá.

Se entiende por peligro sísmico a la probabilidad de que un parámetro del movimiento del suelo (desplazamiento, velocidad, aceleración máxima, magnitud, intensidad, etc.), llegue a superar un nivel o valor esperado en un tiempo t de interés. Usualmente se cuantifica con la frecuencia con que se excede un cierto nivel de aceleración o desplazamiento espectral y depende de la tectónica del territorio y de la sismicidad de las fuentes que intervienen en una región (Pérez *et al.*, 2005).

El análisis de peligro sísmico integrado con otras áreas de estudio como la geología, sismología, ingeniería sísmica, ciencias económicas, etc., llega a ser el paso inicial para la evaluación de vulnerabilidad y riesgo sísmico, cuyos resultados finales se ven reflejados en

1.2. ANTECEDENTES

medidas de prevención y mitigación de efectos provocados por sismos.

Desde 1910 la Sociedad Sismológica de América identificó tres problemáticas asociadas con los sismos: el evento sísmico en sí (dónde, cuándo y cómo ocurre), el movimiento tectónico asociado y el efecto en las estructuras (McGuire, 2004). Cornell (1968) estableció una manera de adoptar métodos probabilistas en problemas sísmicos. Los métodos probabilistas parten del conocimiento de la sismicidad pasada para deducir las leyes estadísticas que regirán la actividad sísmica futura. Con ello se estima la probabilidad de que los distintos niveles de movimiento del suelo sean superados en un periodo de tiempo dado.

En este trabajo el análisis de peligro sísmico se realizó aplicando la metodología desarrollada por McGuire (2004), modificada e implementada en el programa de cómputo EZ-FRISK v7.62 TM. Esta metodología integra un conjunto de información sismotectónica, parámetros sismológicos y leyes de atenuación regionales para diferentes mecanismos de ruptura. Finalmente los resultados se presentan en curvas de peligro sísmico que muestran la probabilidad de excedencia para ciertos parámetros sísmicos.

1.2. Antecedentes

El primer gran temblor que afectó a una ciudad en México con edificios de estilo “moderno” fue el terremoto de Colima de 1941 (Ordaz, 1992) con una magnitud de aproximadamente 7 en la escala de Richter (Figueroa, 1970). Los daños ocasionados entonces propiciaron la elaboración del primer reglamento de construcciones mexicano que incluyó disposiciones de diseño sísmico. Este fue el primer código en el que se exigían mayores especificaciones de diseño para construcciones en terreno blando que para estructuras en terreno firme. Se incluyó un mapa de la ciudad en que se distinguían ambos tipos de terreno, este mapa es la primera carta de microzonificación de observancia obligatoria, posteriormente Iglesias *et al.* (1993) presentó una descripción más elaborada de la microzonificación para la ciudad de México.

Entre los primeros estudios de peligro sísmico realizados para México se encuentran los trabajos de Nishenko y Singh (1987), donde se presentaron probabilidades de ocurrencia condicionales dependientes del tiempo, para determinar la recurrencia de sismos intraplaca

de larga duración y magnitudes grandes a lo largo de la zona de subducción mexicana para intervalos de 5, 10 y 20 años. Ordaz *et al.* (1989), estudiaron razones de excedencia para magnitudes de sismos. Esteva y Ruiz (1989) presentaron el análisis probabilista del riesgo de daños por sismo en construcciones de México. Zúñiga *et al.* (1997) presentaron un proyecto completo de estudio de peligro sísmico en Latinoamérica y el Caribe, donde también se incluyó la regionalización sismotectónica de México.

En los últimos diez años, se han llevado a cabo estudios sismológicos e ingenieriles que permiten obtener mejores descripciones del peligro sísmico en México, de las que se tenían a principios de los años noventa. Es así, que se realizaron trabajos de estudio de peligro sísmico para varias ciudades de la República Mexicana, utilizando metodologías deterministas y también enfoques probabilistas (Gómez Bernal *et al.*, 1999; Jaimes y Reinoso, 2001; Gama, 2010).

Particularmente, en Canadá el National Building Code of Canada (NBCC, 2005), presenta modelos de peligro sísmico de 4ta generación que incluyen mapas con valores medios de aceleración del terreno para sitios con suelo firme (Halchuk y Adams, 2008). Los parámetros sísmicos utilizados fueron las aceleraciones espectrales para la aceleración pico de terreno (PGA), y para periodos de 0.2 s, 0.5 s, 1 s y 2 s. Estos parámetros permiten la construcción de espectros de peligro uniforme (EPU) para cualquier sitio de Canadá.

La metodología que utilizaron fue la de calcular los cinco parámetros sísmicos para alrededor de 200 000 puntos, en una malla definida por latitud y longitud (puntos a cada 10° de longitud), o distancias entre puntos de 10 km para todo el territorio canadiense y un porcentaje de territorio de EE.UU. El usuario puede recurrir al programa de interpolación en línea y especificar coordenadas de algún punto en la zona (http://www.earthquakescanada.nrcan.gc.ca/hazard-alea/interpolat/index_2005-eng.php), los resultados incluyen los cinco parámetros sísmicos estudiados para diferentes periodos de retorno (2 %, 5 %, 10 % y 40 % en 50 años). La metodología de interpolación utilizada en el caso canadiense, es la misma que en este trabajo se utilizó, desarrollada por Shepard (1968). La cual considera una ponderación de las distancias y mínimo de 5 puntos de interpolación, esta metodología permite que los resultados interpolados difieran de los calculados en menos de 2 %, 19 veces de cada 20.

Los mapas de aceleraciones espectrales para los cinco parámetros sísmicos presentados

1.3. JUSTIFICACIÓN

en el NBCC (2005) permiten una buena aproximación de los EPU para cualquier sitio de Canadá, en este trabajo se buscó interpolar en forma directa los EPU para diferentes sitios utilizando la misma metodología de interpolación, que ha presentado buenos resultados para el mencionado código canadiense.

1.3. Justificación

Los temblores destructivos de México destacan por su tamaño y por su frecuencia de ocurrencia, se originan en el contacto entre las placas de Cocos y la Norteamericana, y en la frontera entre esta última y la pequeña placa de Rivera, que está frente a las costas del Pacífico mexicano en Jalisco. En estas fronteras de placa, tienen lugar procesos de subducción, en virtud de los cuales las placas oceánicas más ligeras, Rivera y Cocos, se sumergen bajo la Placa Continental, en la figura 1.1 se puede observar la distribución de las placas tectónicas mencionadas. Estos movimientos son los responsables de la gran mayoría de los terremotos que han provocado daños en México.

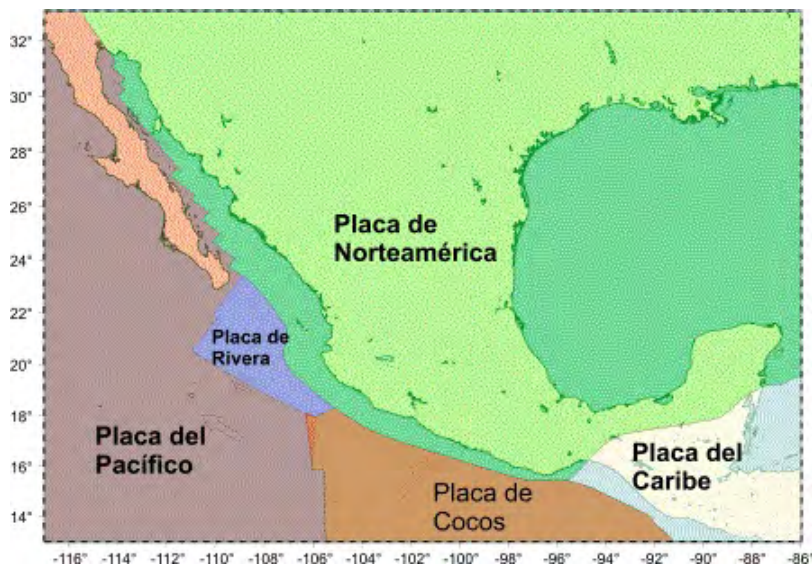


Figura 1.1 Placas tectónicas que interactúan en territorio mexicano. Fuente: Servicio Sismológico Nacional de México.

El temblor de mayor magnitud que se registró en el siglo XX, es el llamado terremoto de Jalisco de 1932, con Magnitud de $M_S = 8.2$ (Figueroa, 1970; Nava, 1987), dicho evento se supone que rompió parte de la corteza, causando grandes daños en las poblaciones de los

estados de Colima y Jalisco, resultando la ciudad de Colima la más dañada.

Los grandes temblores no ocurren de forma aleatoria, sino que presentan ciertas recurrencias, en las zonas de subducción cuando ocurre un sismo de estas características, la probabilidad de que vuelva a ocurrir otro en la misma zona es muy baja. Esto hace que las zonas donde hace mucho tiempo no ocurre un movimiento sísmico, se conviertan en zonas con alto peligro sísmico. En algunos casos las zonas de alto peligro sísmico, debido a el tipo de suelo y condiciones topográficas, incrementan su peligrosidad debido a efectos de amplificación local.

A medida que se presentan nuevos eventos sísmicos, se refinan las metodologías existentes y se mejora la capacidad de predicción de eventos con estudios de peligro sísmico. Los resultados se incluyen en las especificaciones de diseño sísmico que toda ciudad debe poseer, sobre todo en aquellas en las que este tipo de estudios han sido escasos. Las curvas de peligro sísmico obtenidas con análisis del peligro sísmico de una región, son muy importantes para decidir el nivel de aceleración (o cualquier otro parámetro sísmico) con el que se debe diseñar una estructura.

Entonces, reducir el riesgo sísmico requiere conocimiento, planeación y recursos que permitan tomar decisiones con base en un buen análisis de peligro sísmico (McGuire, 2004), el cual resulta ser una variable de entrada fundamental en el proceso de toma de decisiones para la mitigación de efectos de sismos.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Estudiar el peligro sísmico para el segmento Ometepec, de la zona de subducción del estado de Guerrero y presentar una metodología de interpolación de Espectros de Peligro Uniforme para zonas aledañas hasta 70 km a la redonda de Ometepec.

1.4.2. Objetivos específicos

- Describir el procedimiento para realizar el análisis de peligro sísmico: enfoque determinista y enfoque probabilista.

1.5. ALCANCES

- Definir la metodología a utilizar para realizar el análisis de peligro sísmico en la zona de estudio, que permita obtener curvas de peligro sísmico para la aceleración del terreno y espectros de peligro uniforme.
- Estudiar la sismicidad histórica de la zona seleccionada.
- Caracterizar e identificar las fuentes sísmicas que generan peligro sísmico.
- Analizar las condiciones geológicas y geotécnicas de la zona de estudio.
- Seleccionar y utilizar relaciones de atenuación del movimiento fuerte del suelo para estimar aceleraciones espectrales y aceleraciones pico de terreno, que permitan calcular Espectros de Peligro Uniforme (EPU) para la región de estudio.
- Realizar una interpolación de resultados (EPU) para obtener nuevos parámetros sísmicos para el segmento Ometepec, utilizando el Método de Ponderación de la Distancia Inversa (IDW), según la metodología planteada por Shepard (1968), para obtener una malla de puntos con EPU conocidos en el segmento Ometepec.
- Obtener acelerogramas de sitio empatados con los espectros de peligro uniforme, calculados utilizando la técnica del Ajuste de Espectros (*Spectral Matching*) en el dominio del tiempo.

1.5. Alcances

En este trabajo se utilizaron métodos e información basadas en referencias históricas, teóricas y para el caso del estudio de sismicidad regional, se recurrió a estudios reportados en la literatura y reportes de reconocimiento de daños de sismos pasados en la región de estudio.

Para Ometepec y las ciudades estudiadas para la interpolación de Espectros de Peligro Uniforme (EPU), se identificaron y caracterizaron las posibles fuentes sísmicas generadoras de actividad sísmica en la región de estudio. No se ha considerado un estudio detallado de los efectos de sitio en la región, sin embargo según los reportes obtenidos de reconocimiento de daños de sismos pasados, no se han observado amplificaciones de aceleración debido a

la estratigrafía del suelo, por lo que en este trabajo se ha considerado el estudio en terreno firme.

Se seleccionaron relaciones de atenuación de la literatura actual existente para la región de estudio, que describen las aceleraciones espectrales para terreno firme y las aceleraciones máximas de terreno, no se desarrollaron ecuaciones de atenuación particulares para el sitio. Se realizó la interpolación de EPU con una metodología alternativa a las existentes, limitando a tres casos de estudio, utilizando dos ecuaciones de atenuación. Finalmente, con un análisis determinista y utilizando la metodología de desagregación del peligro sísmico se seleccionaron acelerogramas semilla, para luego utilizar la técnica del Ajuste de Espectros (*Spectral Matching*), limitando el estudio a las estaciones acelerográficas más cercanas a Ometepec ya que no se cuenta con una estación en el sitio.

Se consideró únicamente la problemática del peligro sísmico para Ometepec, sin abarcar el estudio de riesgo sísmico, dejando la posibilidad a trabajos futuros de continuar con la información presentada.



2 Métodos de Análisis de Peligro Sísmico

*Todo se debe hacer tan simple como sea posible,
pero no trivial.*

A. Einstein

El concepto de peligro sísmico suele emplearse en las dos acepciones siguientes:

1. El peligro sísmico es cualquier fenómeno físico asociado con un sismo (movimiento del terreno, falla del terreno, licuación y tsunamis) y sus efectos sobre el uso del suelo, las estructuras hechas por el hombre, y los sistemas socio-económicos, que tienen el potencial de producir daño o pérdida (Bormann *et al.*, 2003). Ejemplos de ello, son la amplitud del movimiento sísmico en cierto intervalo, las olas inducidas por un tsunami que alcanzan cierta elevación en un puerto, etc.
2. Los resultados de un análisis de peligro indican la probabilidad de que ocurra un nivel determinado de movimiento sísmico del terreno, en un punto específico, dentro de cierto periodo de tiempo (Bormann *et al.*, 2003; Thenhaus y Campbell, 2003). En este caso, el peligro sísmico suele ser calculado como la frecuencia (número de veces por unidad de tiempo), en que una amplitud del movimiento sísmico del terreno será mayor que un valor especificado (McGuire, 2004).

Para realizar la evaluación de peligro sísmico, se selecciona el parámetro o parámetros que evaluarán la excitación del suelo. Indudablemente, el interés de los ingenieros se dirige a los parámetros que miden el daño producido por un sismo o que puede sufrir una estructura;

por ello, la intensidad y la aceleración máxima son los conceptos que más aceptación han recibido en los análisis de peligrosidad (Herraiz, 1997).

Los métodos utilizados para evaluar el peligro sísmico pueden describirse mediante dos enfoques: deterministas y probabilistas. Ambos métodos consideran que los sismos que ocurrirán en el futuro tendrán las mismas características de eventos sucedidos en el pasado, por lo que en ambos casos el historial de sismicidad de la zona de estudio es fundamental. Inicialmente se consideraba la sismicidad como un fenómeno estacionario, sin embargo, varias investigaciones realizadas en los últimos años consideran modelos no estacionarios que tienen en cuenta diferente probabilidad de ocurrencia de los sismos antes y después de un terremoto de notable magnitud (Duarte y Campos-Costa, 1992).

Al evaluar el peligro sísmico se deben identificar y evaluar todas las fuentes de actividad sísmica. Entonces, se debe revisar: la evidencia geológica (identificar fallas y el tipo de actividad que registran) y la correlación entre la magnitud de sismos con la longitud, área de ruptura y desplazamientos de fallas mediante correlaciones que permitan evaluar y predecir magnitudes de sismos esperados (Kramer, 1996).

2.1. Enfoque Determinista para la evaluación de peligro sísmico

Los métodos deterministas analizan la sismicidad propia de cada zona sismogénica que afecta al lugar de estudio, con objeto de estimar el máximo sismo potencial o que razonablemente se puede esperar en cada una de ellas, a este sismo se le conoce como sismo CARACTERÍSTICO. Este es el único evento sísmico considerado en el análisis y se acepta que volverá a repetirse en el futuro (Herraiz, 1997).

Esta metodología se puede describir como un procedimiento de cuatro pasos según Kramer (1996) y Reiter (1990):

1. **Primera etapa:** Identificación y caracterización de todas las fuentes sísmicas capaces de producir movimientos significativos de suelo en el sitio de estudio. La caracterización de la fuente incluye la definición de la geometría de la falla, su potencial sísmico y los parámetros internos, muy importantes en el campo cercano.

2.2. ENFOQUE PROBABILISTA PARA LA EVALUACIÓN DE PELIGRO SÍSMICO

2. **Segunda etapa:** Se realiza la selección del parámetro de distancia de la fuente al sitio, para cada zona de la fuente. Esta distancia puede definirse de diferentes maneras, en algunos estudios de peligro sísmico determinista, se define como la distancia epicentral o hipocentral más corta entre la zona de la fuente y el sitio de interés; la distancia de fuente a sitio debe ser congruente con la definida en las relaciones de atenuación que se usarán en la tercera etapa.
3. **Tercera etapa:** Selección del sismo de control (por ejemplo, el sismo esperado que producirá la sacudida más fuerte, generalmente se expresa en términos de algún parámetro del movimiento del terreno en el sitio. La selección se hace comparando los niveles de sacudida producidos por sismos (identificados en la primera etapa) que se suponen ocurrirán en las distancias identificadas en la segunda etapa.
4. **Cuarta etapa:** El peligro sobre el sitio se define formalmente en términos de los movimientos del terreno en el sitio provocados por el sismo de control. Las características son descritas por uno o más parámetros del movimiento del terreno obtenidas de relaciones de atenuación del movimiento fuerte del suelo. La aceleración pico, velocidad pico y ordenadas del espectro de respuesta se usan para caracterizar el peligro sísmico.

La hipótesis de partida del método determinista es muy discutible ya que es difícil estimar el sismo de control (aquel que se espera produzca el mayor nivel de movimiento), ya que se basa en la historia de intensidades y resultan en valores relativos de la región donde se miden.

2.2. Enfoque Probabilista para la evaluación de peligro sísmico

La determinación del criterio del sismo de diseño a partir de un análisis probabilista fue formulado por Cornell (1968). El método utiliza dos modelos:

- Un modelo de sismicidad, que describe la distribución geográfica de las fuentes de un evento y una distribución de magnitudes; que se expresa mediante *relaciones de atenuación del movimiento fuerte del suelo*, como la de Gutenberg y Richter (1944).

- Un modelo de atenuación (relación de atenuación) que describe los efectos sobre un sitio dado mediante funciones que dependen de la magnitud, distancia de fuente a sitio, tipo de suelo, entre otras variables.

Los métodos probabilistas están basados en el historial de sismicidad, de manera que llegan a obtener leyes estadísticas que rigen la actividad sísmica futura; estiman la probabilidad de que ciertos niveles de movimiento se superen en un lapso de tiempo.

La peligrosidad se evalúa sumando la influencia de todas las fuentes consideradas. Esto proporciona una curva de probabilidad anual de superación de diferentes valores del parámetro sísmico seleccionado. A partir de ella, se obtiene la probabilidad correspondiente al tiempo de vida útil de la estructura. El inverso de la probabilidad anual de excedencia se llama periodo de retorno, e indica el número de años en el que se espera la superación del nivel elegido. La validez de este método queda limitada por la extensión y homogeneidad de la muestra de sismos, y su capacidad de incluir los eventos importantes; sin embargo los métodos probabilistas son mucho más empleados que los deterministas.

El punto de partida es, necesariamente, el conocimiento de la sismicidad de la región, que rodea al emplazamiento y la delimitación de las zonas sismogénicas que puedan afectarle. La extensión de la zona que debe ser evaluada depende del tipo de problema: emplazamiento de una instalación crítica, análisis del peligro sísmico de una zona o una población, estudio de microzonificación, etc. El análisis de peligro sísmico probabilista se caracteriza con las siguientes etapas, según Reiter (1990) y Kramer (1996):

2.2.1. Primera etapa: Identificación y caracterización de las fuentes sísmicas

Se utilizan los estudios de paleosismicidad, las descripciones históricas, los catálogos sísmicos, los mapas de isosistas y toda la información instrumental que pueda recogerse. La información sísmica se contrasta con los datos geológicos con el fin de identificar las fallas activas o definir las regiones sismogénicas activas. La descripción de la sismicidad debe incluir los parámetros que evalúan el proceso en el foco (principalmente: mecanismo y caída de esfuerzos); el tamaño (magnitud y momento sísmico) y los que dan la localización espacio-temporal (coordenadas hipocentrales y hora origen), (Herraiz, 1997).

2.2. ENFOQUE PROBABILISTA PARA LA EVALUACIÓN DE PELIGRO SÍSMICO

Para este proceso es necesario contar con suficientes registros sísmicos; en el caso de no contar con estos registros, se puede recurrir a métodos alternos como en el que se construyen funciones de Green empíricas (Gama, 2010).

2.2.2. Segunda etapa: Establecer las relaciones de recurrencia

En esta etapa, es necesario asegurar que los datos son homogéneos (están expresados en la misma escala de magnitud o intensidad), independientes (se han eliminado los premonitores y las réplicas) y completos (la muestra incluye todos los sismos más importantes, generalmente se toman los sismos de magnitudes mayores a $M > 5$ o de intensidades (MMI) mayores a V. Entonces la relación de recurrencia, que especifica la tasa promedio sobre la cual un sismo de algún tamaño será excedido, se usa para caracterizar la sismicidad de cada zona de la fuente. La ley de recurrencia más utilizada es la presentada por Gutenberg y Richter (1944), donde λ_m expresa la tasa media anual de excedencia de la magnitud m , y está definida según la ecuación 2.1.

$$\log \lambda_m = a - b \cdot m \quad (2.1)$$

Donde 10^a es el promedio anual de número de sismos de magnitud mayor o igual que cero, el término a recibe el nombre de actividad sísmica, el valor b describe la probabilidad relativa de sismos pequeños o grandes. Ambos coeficientes se obtienen mediante una regresión lineal de los datos recopilados de sismos de cierta magnitud que corresponden a cierta cantidad de eventos registrados.

2.2.3. Tercera etapa: Definición de relaciones predictivas

El movimiento del terreno, provocado por sismos de cualquier tamaño que ocurran en cualquier punto de cada fuente sísmica, debe calcularse con relaciones predictivas. Las incertidumbres inherentes a las relaciones predictivas también se consideran en el análisis de peligro sísmico probabilista. Las relaciones de predicción se obtienen empíricamente, mediante regresiones de mínimos cuadrados, u otras metodologías, de un conjunto de parámetros de movimiento de suelo, como se muestra en la ecuación 2.2. Estas son funciones

de la magnitud, la distancia y en algunos casos dependen de otras variables.

$$Y = Y(m, R) \quad (2.2)$$

Generalmente los movimientos de suelo se asumen como distribuciones de probabilidad log-normalizadas. La caracterización de estas relaciones de predicción se pueden explicar de acuerdo con Gama (2010):

1. Los valores pico de parámetros del movimiento del terreno se aproximan mediante distribuciones lognormales. Obteniéndose la regresión sobre el logaritmo del parámetro de interés de movimiento del terreno (Y).
2. La magnitud sísmica está típicamente definida como el logaritmo de algún parámetro del movimiento pico. Consecuentemente, $\ln Y$ puede ser proporcional a la magnitud (M).
3. La propagación de las ondas sísmicas viajan desde la fuente de un sismo, produciendo amplitudes en las ondas de cuerpo que decrecen de acuerdo a $\frac{1}{R}$ y amplitudes de ondas superficiales que decrecen de acuerdo con $\sqrt{\frac{1}{R}}$.
4. El área donde ocurre la ruptura de la falla se incrementa de acuerdo con el incremento de la magnitud del sismo. En algunos casos la distancia efectiva, que recorren las ondas que provocan el movimiento fuerte sobre un sitio R incrementa de acuerdo con el incremento de la magnitud.
5. Parte de la energía acarreada por las ondas de esfuerzos, es absorbida completamente en el viaje por los materiales del suelo. Este amortiguamiento del material, causa amplitudes del movimiento del terreno que disminuyen exponencialmente con R .
6. Los parámetros del movimiento del terreno pueden estar influenciados por las características de la fuente (dislocación repentina, normal o falla inversa) o características del sitio (estratigrafía del suelo).

2.2. ENFOQUE PROBABILISTA PARA LA EVALUACIÓN DE PELIGRO SÍSMICO

Entonces la ecuación 2.2 se puede expandir, de manera general, como:

$$\underbrace{\ln Y}_1 = \underbrace{C_1 + C_2 M + C_3 M^{C_4}}_2 + \underbrace{C_5 \ln[R]}_3 + \underbrace{C_6 \exp(C_7 M)}_4 + \underbrace{C_8 R}_5 + \underbrace{f(fuente) + f(sitio)}_6 \quad (2.3)$$

Donde: $\sigma_{\ln Y} = C_9$ describe incertidumbres en los valores de los parámetros del movimiento del terreno dados por las relaciones de predicción. Tanto el tipo de terreno y, en general, la ubicación geográfica de los sismos utilizados para desarrollar las ecuaciones de atenuación, determinan su aplicabilidad a un sitio dado.

2.2.4. Cuarta etapa: Distribución de probabilidad del movimiento

La aplicación de las leyes estadísticas, para estimar la probabilidad de ocurrencia en el emplazamiento de un determinado valor del parámetro de tamaño (magnitud o intensidad), o de movimiento de suelo, (por ejemplo, aceleración máxima), representa la última etapa del método probabilista.

Las relaciones de frecuencia de excedencia usadas, aceptan que la ocurrencia de sismos en un año es un proceso de Poisson, es decir que cada suceso es independiente temporalmente de los anteriores; la probabilidad de ocurrencia simultánea de dos o más sucesos es infinitesimal, y el número (N) medio de sucesos que tienen lugar por unidad de tiempo es temporalmente constante (Lomnitz, 1974), donde es posible combinar el modelo de Poisson con una ley de recurrencia para predecir la probabilidad de que se presente al menos una excedencia en un periodo de t años, según la ecuación 2.4 (Kramer, 1996):

$$P[N \geq 1] = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2.4)$$

Recordemos que las incertidumbres están asociadas a cada parámetro que se usa en el análisis de peligro sísmico probabilista (Dowrick, 2009). Las curvas de peligro sísmico para cada fuente se pueden obtener y combinar para expresar el peligro existente en un sitio particular. La probabilidad de que un parámetro del movimiento del suelo (Y) llegue a exceder un valor particular (x), se calcula para un sismo particular en un sólo lugar posible, y es multiplicado por la probabilidad de que ese sismo particular de magnitud (m) llegue a ocurrir en esa ubicación (r). Este proceso se repite para todas las magnitudes de sismo, y ubicaciones

de fuente posibles, sumando sus probabilidades particulares. Entonces, la expresión que representa la probabilidad de que un parámetro (Y) llegue a exceder un valor particular (x), está dada según la ecuación (Kramer, 1996):

$$P[Y > x] = \int \int P[Y > x | m, r] f_M(m) f_{R|M}(r, m) dr dm \quad (2.5)$$

Donde $P[Y > x | m, r]$, se obtiene de las relaciones de predicción (leyes de atenuación) elegidas (sección 2.2.3); $f_M(m)$ es la función de densidad de probabilidad de magnitudes (parte de las relaciones de recurrencia definidas); $f_{R|M}(r, m)$ representa la función de densidad de probabilidad para distancia de fuentes a sitio, y se obtiene a partir de la caracterización de fuentes.

Considerando que los sitios de estudio generalmente están afectados por N_S potenciales fuentes sísmicas, y cada una de ellas tiene un tasa promedio de eventos (con magnitud mayor a un umbral m_0) representada por $v_i = \exp(\alpha_i - \beta_i m_0)$, la tasa promedio de todas las fuentes sísmicas se puede expresar como la integral:

$$\lambda_x = \sum_{i=1}^{N_S} v_i \int \int P[Y > x | m, r] f_{M_i}(m) f_{R|M_i}(r, m) dr dm \quad (2.6)$$

Las integrales son evaluadas de manera numérica por diferentes métodos, una aproximación fiable es la de considerar segmentos de N_S fuentes de sismos potenciales, N_m magnitudes posibles y N_R distancias a la fuente, por lo que la tasa de excedencia total para toda la región (λ_x) puede estimarse con:

$$\lambda_y = \sum_{i=1}^{N_S} \sum_{j=1}^{N_M} \sum_{k=1}^{N_R} (v_i P[Y > x | m_j, r_k] P[M = m_j] P[R = r_k]) \quad (2.7)$$

Las ecuaciones corregidas para evaluar el peligro sísmico de las fuentes tipo falla y área se describen en el apéndice D

2.3. Discusión sobre metodologías y decisiones sobre mitigación de efectos sísmicos

En cualquier análisis de peligro o de riesgo sísmico, los resultados deberían ser utilizados para tomar decisiones importantes respecto a la seguridad de una región. Estas se verán reflejadas en la selección de especificaciones de diseño, estimación de pérdidas económicas mínimas debido a terremotos, inversiones en los sistemas de seguridad de estructuras en general, planificación en la respuesta a emergencias, post-recuperación de sismos y planificación de recuperación a largo plazo. Estas decisiones pueden asimilarse mejor con ambos enfoques, deterministas y probabilistas, por lo que estos análisis deben ser complementarios.

En general, las decisiones más complejas y sutiles, con entornos sísmicos detallados sugieren el uso del análisis probabilista; mientras que decisiones que requieren de mayor conocimiento de la sismicidad y tectónica de la región apuntan a utilizar métodos deterministas. Con el fin de clasificar el tipo de metodología a utilizar, se presenta la tabla 2.1 de comparación.

Decisión	Aspectos cuantitativos de la decisión	Enfoque predominante
Definición de Niveles de diseño sísmico	Altamente cuantitativo	Probabilístico
Adaptación de diseño sísmico	Altamente cuantitativo	Probabilístico
Estudio de seguros financieros en estructuras	Altamente cuantitativo	Probabilístico
Diseño de sistemas industriales redundantes	Cuantitativo o cualitativo	Ambos
Entrenamiento y planeación de respuesta ante emergencias	Mayormente cualitativo	Determinístico
Planificación para recuperación pos-sismo	Mayormente cualitativo	Determinístico
Planificación (recuperación local) a largo plazo	Mayormente cualitativo	Determinístico
Planificación (recuperación regional) a largo plazo	Mayormente cualitativo	Probabilístico

Tabla 2.1 Comparación entre metodologías; McGuire, 2001

El hecho de que cada metodología se recomienda para distintos casos particulares, no quiere decir que un análisis excluye al otro. De hecho, el panorama completo del problema se puede reproducir de mejor manera cuando se usan ambos enfoques, lo que permite al

análisis probabilístico guiar la elección de los acontecimientos deterministas, y dejar que los acontecimientos deterministas guíen el refinamiento de el análisis probabilístico. De esta manera se tomarán mejores decisiones para reducir riesgos sísmicos.

2.4. Metodología utilizada para la obtención de Espectros de Peligro Uniforme (EPU)

Si bien los resultados del análisis de peligro sísmico se ven reflejados en las tasas de excedencia de ciertos parámetros sísmicos: aceleración pico del terreno (PGA), velocidad pico del terreno (PGV), etc. Dependiendo de la tectónica del territorio y de la sismicidad de las fuentes que intervienen en la región, es imprescindible traducir estos resultados en herramientas de diseño sísmico específicas que permitan a los ingenieros definir claramente niveles de aceleración, así como las demandas máximas de desplazamiento, que las estructuras emplazadas en un sitio en particular experimentarán.

Los espectros de diseño parten de la obtención de los Espectros de Peligro Uniforme (EPU), que son el producto del análisis probabilístico del peligro sísmico. Inicialmente se tienen curvas de peligro sísmico para diferentes periodos (p.e. aceleraciones espectrales para PGA, 0.1 s, 1 s, etc.), los valores del EPU se extraen de las curvas de peligro para cierta probabilidad de excedencia (p.e. 10 % de probabilidad en 50 años, que representa un periodo de retorno de 475 años, el concepto de tasas de excedencia se explica mejor con un ejemplo en el apéndice A); entonces un EPU tiene la característica principal de que sus ordenadas tienen la misma probabilidad de ser excedidas en un lapso dado y en las abscisas se tiene un conjunto de osciladores con distintos periodos.

En la figura 2.1 se muestran las curvas de peligro sísmico calculadas para Ometepepec con la relación de atenuación de García y otros (2005), para el caso de estudio 3 de fuentes sísmicas (320 km alrededor de Ometepepec) para tres periodos 0 s(PGA), 0.1 s, 1 s; la parte derecha de la figura 2.1 muestra gráficamente como los puntos de las curvas de peligro se extraen para formar el EPU para cierta tasa de excedencia, en el ejemplo se trabaja con $\lambda = 2.107E - 3$ (periodo de retorno de 475 años).

2.4. METODOLOGÍA UTILIZADA PARA LA OBTENCIÓN DE ESPECTROS DE PELIGRO UNIFORME (EPU)

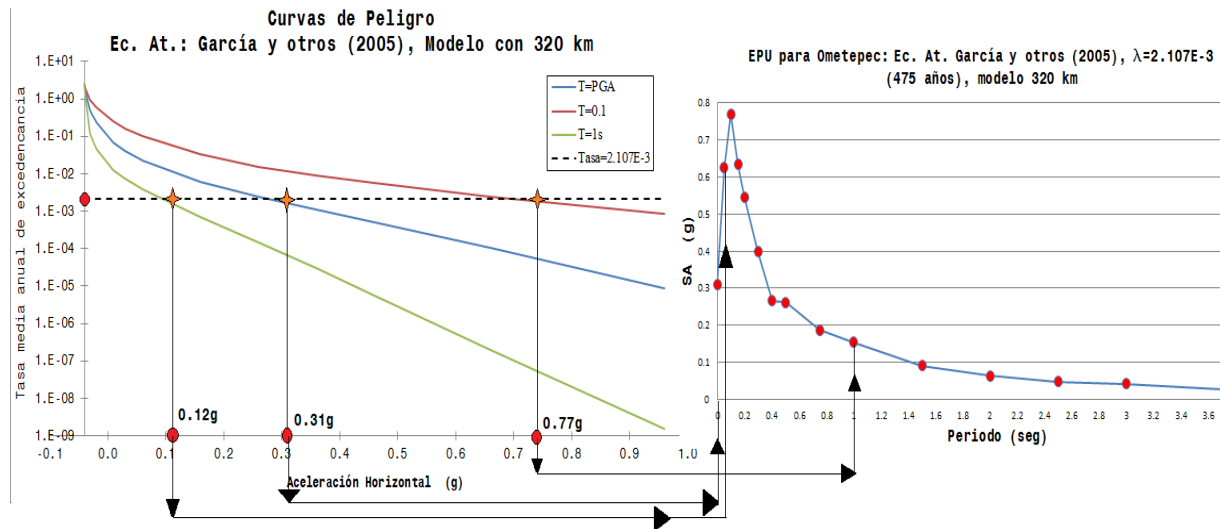


Figura 2.1 Obtención de las ordenadas espectrales de los EPU (der.) a partir de las curvas de peligro sísmico (izq).

En la figura 2.2 se presenta un ejemplo de un EPU calculado para la ciudad de Ometepepec para tres periodos de retorno: $T=2475$ años con probabilidad de 2 % en 50 años, $T=975$ años con probabilidad de 5 % en 50 años y $T=475$ años corresponde a una probabilidad de excedencia de 10 % en 50 años, que son las probabilidades más usuales para el estudio en estructuras civiles.

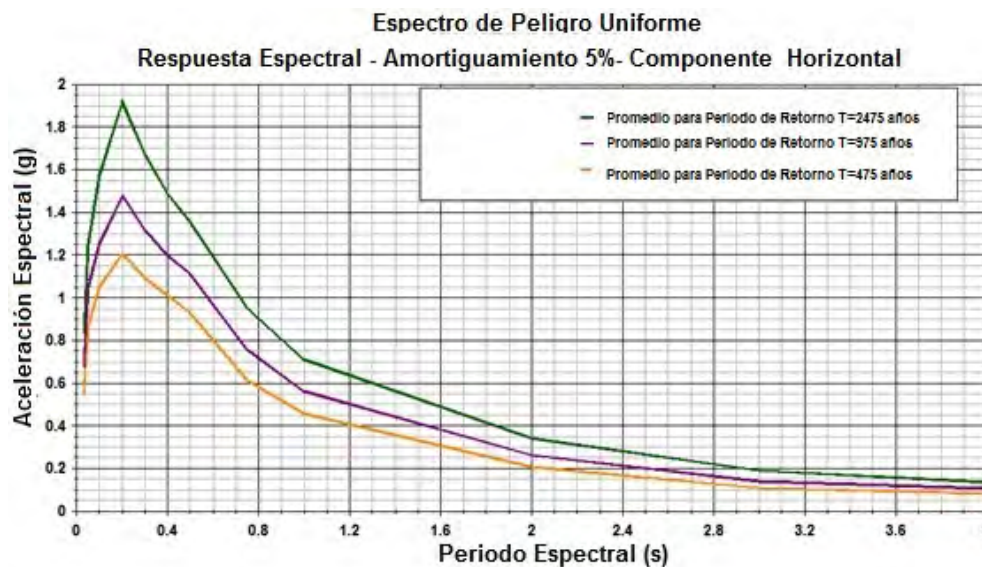


Figura 2.2 Ejemplo de Espectro de Peligro Uniforme (EPU) para la ciudad de Ometepepec, Guerrero. Calculado para probabilidad de 2 %, 5 % y 10 % en 50 años.

Los Espectros de Peligro Uniforme (EPU) no representan un evento en particular, sino todos los eventos posibles considerados en el análisis probabilista del peligro sísmico (todas las combinaciones Distancia - Magnitud a las fuentes) que contribuyen a la distribución de valores espectrales para cada periodo y amortiguamiento para los que son calculados.

En este trabajo se obtuvieron Espectros de Peligro Uniforme (pseudo-aceleración con 5 % de amortiguamiento crítico), calculados para terreno firme o roca en diversos puntos de la región de estudio, considerando diferentes periodos de retorno, de tal manera que puedan ser aplicados para los diferentes análisis estructurales y geotécnicos.

2.4.1. Metodología de Interpolación de Espectros de Peligro Uniforme

Con los espectros de peligro uniforme obtenidos para la región de estudio, en ciertas coordenadas de localización se realizó una interpolación de los EPU para obtener nuevos parámetros sísmicos. Inicialmente se trabajó con coordenadas de ciudades conocidas (en caso de no existir ciudad alguna se elige un punto cualquiera), tomando como centro a Ometepec se trazaron círculos con radios conocidos, de manera que las distancias a los puntos de interpolación estén definidas y se realizó la interpolación en el área existente entre las coordenadas de los puntos seleccionados.

Para lograr la interpolación de los EPU, se utilizó el Método de Ponderación de distancia inversa (IDW) *Shepard* (Shepard, 1968), que es una de las técnicas mayormente utilizadas para la interpolación de parámetros, tanto por su facilidad como por su confiabilidad en los resultados. El método está basado en considerar que la superficie de interpolación debe estar influenciada, en mayor proporción, por los puntos conocidos más cercanos e influyen menos aquellos puntos más distantes. La superficie de interpolación es una media ponderada entre los puntos conocidos y el peso asignado a cada punto; este peso disminuye a medida que la distancia de interpolación conocida aumenta.

En general, para interpolar un parámetro u correspondiente al punto χ de coordenadas x, y , dado un punto conocido χ_i , una vez conocidos los parámetros $u_i = u(\chi_i)$ para $i=1, 2, \dots, N$ puntos; la función de interpolación está dada por la ecuación 2.8, de acuerdo con el

2.5. OBTENCIÓN DE ACELEROGRAMAS A PARTIR DE ESPECTROS DE PELIGRO UNIFORME (EPU)

método de Shepard IDW.

$$u(\chi) = \sum_{i=0}^N \frac{w_i(\chi_i) u_i(\chi_i)}{\sum_{j=0}^N w_j(\chi_j)} \quad (2.8)$$

$$w_i(\chi_i) = \frac{1}{d(\chi, \chi_i)^p} \quad (2.9)$$

$$d(\chi, \chi_i) = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (2.10)$$

Donde N es el número de puntos conocidos; $u_i(\chi_i)$ el parámetro a interpolar correspondiente a cada punto χ_i conocido; $w_i(\chi_i)$ es el peso asignado al parámetro conocido u_i en el punto χ_i conocido de coordenadas x_i, y_i ; p representa un número real arbitrario, conocido como el parámetro de potencia, generalmente puede tomar valores ≥ 2 ; $d(\chi, \chi_i)$ se toma como la distancia desde el punto conocido χ_i al punto que se busca interpolar; x_i, y_i son las coordenadas del punto χ_i conocidas y x, y son las coordenadas del punto χ que se busca interpolar.

El valor del peso asignado a cada punto χ_i definido varía de 1 a un valor cercano a 0, a medida que la distancia de interpolación aumenta; en el apéndice B se presenta un ejemplo de cálculo aplicando la metodología anteriormente explicada.

2.5. Obtención de acelerogramas a partir de Espectros de Peligro Uniforme (EPU)

En los reglamentos sísmicos de diseño de estructuras, es común utilizar espectros de diseño con formas paramétricas (p.e. con mesetas) correspondientes a espectros de pseudo-aceleración de respuesta de sistemas de un grado de libertad. En muchos casos no es suficiente definir el movimiento sísmico sólo en términos de un espectro de diseño, ya que estos no presentan una correlación directa con la pérdida y el daño (Reinoso y Jaimes, 2009). Cuando se realizan análisis de estructuras importantes, poco regulares o se buscan grandes demandas de ductilidad, se deben realizar análisis dinámicos no lineales, cuya certeza está basada, en gran parte, en la selección correcta de acelerogramas de diseño, que representen lo mejor posible el movimiento sísmico en un sitio.

En los reglamentos mexicanos, y por ende en el reglamento de construcciones de

Guerrero, se tiene una incertidumbre respecto a qué acelerogramas de diseño los ingenieros de la práctica deben utilizar. Existen varias metodologías que pueden utilizarse para encontrar acelerogramas requeridos para análisis dinámicos, las cuales son bastante amplias y conllevan estudios extensos, incluso ahora no existe un acuerdo general en utilizar una única metodología. Una vez seleccionada la metodología a seguir, se deben recolectar datos necesarios para aplicarla. La selección de un grupo de acelerogramas que representen al sitio de estudio es una tarea importante, este proceso de selección requiere en la mayoría de los casos, del criterio de la persona (o personas) que realizan el estudio. Los especialistas en el área han presentado recomendaciones para poder seleccionarlos de la mejor manera posible (Naeim *et al.*, 2004; Ay y Akkar, 2010). Las metodologías reportadas en la literatura pueden resumirse en:

- Acelerogramas de Sismos Reales: si el sitio de estudio lo permite, se utilizarán los registros de aceleración obtenidos por las estaciones más cercanas instaladas y tratadas en instituciones dedicadas al estudio y clasificación de esta información. Existen varios factores que influyen en los acelerogramas reales, los parámetros de fuente (en relación a la magnitud, mecanismo de ruptura, directividad, etc.), de sitio (geología del terreno, topografía, etc.) entre otros; que logran que un mismo evento sísmico registrado en diferentes estaciones acelerográficas, tenga variaciones notorias respecto a los demás, y haga de la elección de acelerogramas de sitio un caso de estudio amplio con bastantes incertidumbres (Dowrick, 2009). Muchas regiones no cuentan con catálogos extensos de movimientos sísmicos, lo que puede resultar en análisis inadecuados, en el caso de utilizar registros sísmicos que no correspondan a las fuentes sísmicas por las que está afectado el sitio de emplazamiento de la estructura en estudio.
- Escalar acelerogramas ya existentes en el sitio a nivel (o niveles) de intensidad sísmica requeridas, en la mayoría de los casos, se escala la aceleración espectral (SA) del espectro del acelerograma semilla a la SA del espectro objetivo para el modo fundamental de vibrar de la estructura. En otro caso, se puede escalar el espectro de aceleración a un espectro de diseño, cuya forma paramétrica induce a obtener sobre-estimación en algunas intensidades; todo esto sin considerar la magnitud y distancia del

2.5. OBTENCIÓN DE ACELEROGRAMAS A PARTIR DE ESPECTROS DE PELIGRO UNIFORME (EPU)

evento, al cambiar únicamente el contenido de frecuencias y duración del movimiento.

- Baker *et al.* (2005) desarrollaron metodologías que permiten definir fuentes sísmicas (por magnitud y distancia) que contribuyen a exceder cierta distorsión de entrepiso en estructuras, mediante un análisis probabilista de la demanda sísmica (*Probabilistic Seismic Demand*, PSDA). Con lo que es posible recurrir a acelerogramas que cumplan con los parámetros sísmicos estimados.
- En el caso de no contar con registros sísmicos suficientes, es posible recurrir a movimientos sísmicos simulados y lograr su compatibilidad con ciertos espectros de diseño para el sitio (Carballo y Cornell, 2000; Naeim *et al.*, 2004), sin embargo, esta metodología tiene la desventaja de resultar en movimientos sísmicos sin contenidos de frecuencia real, resultando en demandas de desplazamientos sobre-estimadas (Naeim y Lew, 1995).
- Otra metodología bastante recurrida, es la que permite simular movimientos sísmicos basados en modelos físicos que consideran la fuente, propagación de onda y efectos de sitio (Boore, 1983); estos métodos tienen la ventaja de considerar un modelo físico de la fuente, pero hay todavía incertidumbres en la estimación de parámetros sismológicos como la caída de esfuerzos, el momento sísmico y la atenuación (Reinoso y Jaimes, 2009).

Por todo lo mencionado, no es posible afirmar que el procedimiento para obtener acelerogramas de diseño a partir de EPU resulte trivial. En esta investigación se adoptó una metodología de escalamiento para acelerogramas reales del sitio registrados en terreno firme, no se consideró el efecto de estrato blando al no contar con estudios de sondeos recientes en la región de estudio, se obtuvieron los acelerogramas escalados según los EPU previamente calculados en este estudio para diferentes periodos de retorno. En la figura 2.3 se muestra el ejemplo de un acelerograma real registrado por la estación Copala para el sismo del 14 de Septiembre de 1995.

En este estudio, se recurrió al uso de temblores reales porque estos, siendo de intensidad moderada, preservan las características de la fuente sísmica, del trayecto que sigue el campo ondulatorio hasta el sitio en que fue registrado y, especialmente, de las condiciones locales

CAPÍTULO 2. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE PELIGRO SÍSMICO

del terreno. Además, debido a que se cuenta con los resultados de un análisis de peligro sísmico para el sitio, es posible utilizar la desagregación de los resultados obtenidos para seleccionar, con base en las características de la fuente sísmica y de la región de estudio, los eventos sísmicos que mayor contribución tengan al peligro, para luego escalarlos mediante una metodología seleccionada, los detalles sobre la desagregación y las metodologías de escalar y filtrar los acelerogramas se describen en los siguientes títulos.

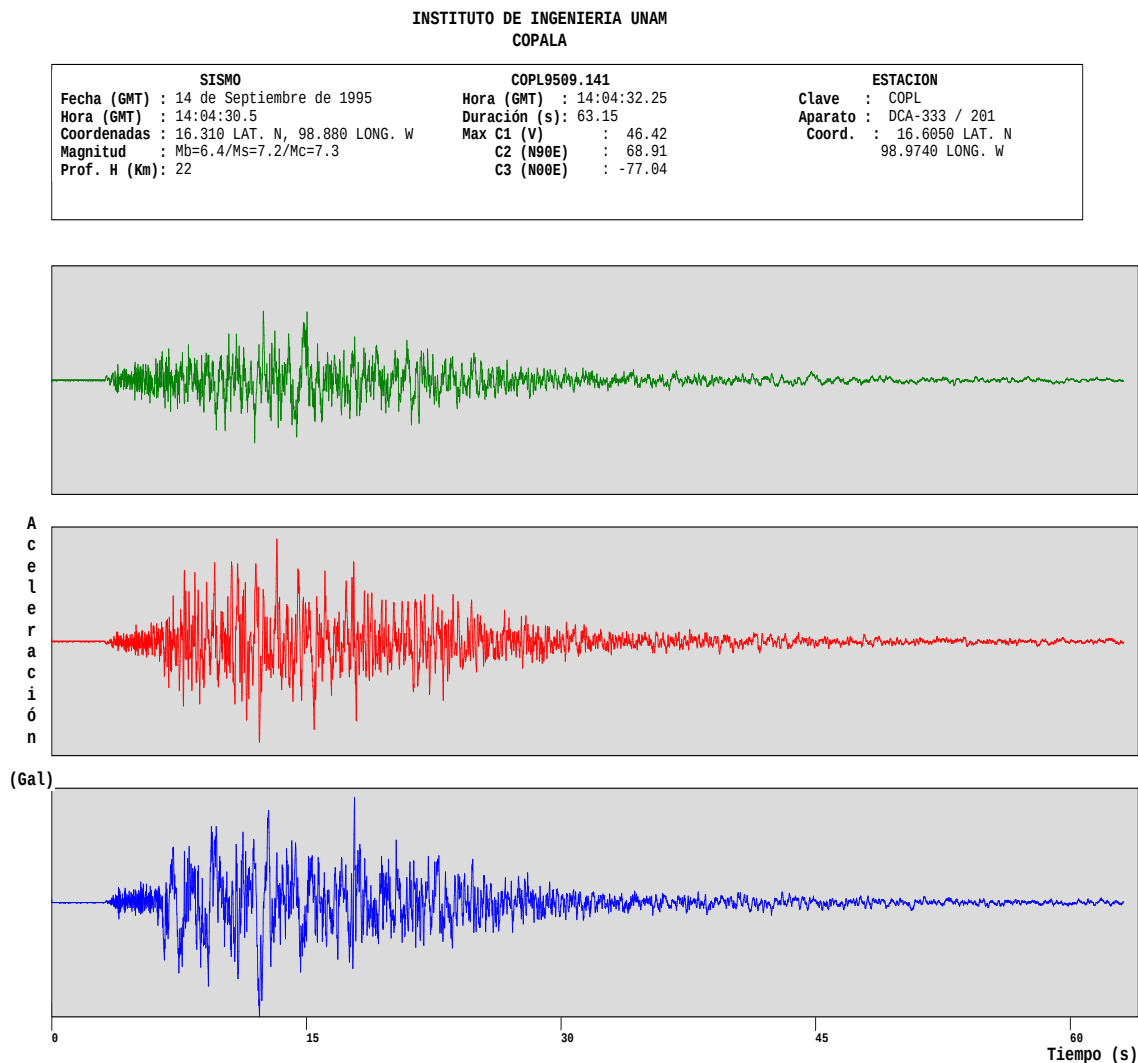


Figura 2.3 Registros acelerográficos para tres canales (N0° E, N90° E y V) del sismo del 14 de Septiembre de 1995 ($M_s=7.2$, $M_b=6.4$), registrada por la estación COPL (Copala) del Instituto de Ingeniería, UNAM. Fuente: Base Mexicana de Sismos Fuertes.

2.5. OBTENCIÓN DE ACELEROGRAMAS A PARTIR DE ESPECTROS DE PELIGRO UNIFORME (EPU)

2.5.1. Desagregación

Es necesario conocer las fuentes y las magnitudes que mayor aporte brindan al peligro sísmico, lo cual es posible por medio del proceso de desagregación. Este proceso muestra la contribución a la frecuencia anual de excedencia de acuerdo a la magnitud, distancia y parámetros de desviación estándar de las relaciones de atenuación. Si el valor de aceleración A ocurre en el lugar de interés para la evaluación de la amenaza, ciertas magnitudes, distancias y valores de desviación contribuyen a dicha aceleración más que otros. El proceso de desagregación muestra estas contribuciones relativas. Este proceso requiere que la frecuencia anual de excedencia se exprese como función de la magnitud y/o distancia; la técnica descrita por Kramer (1996) permite observar estos casos, para el caso de la frecuencia anual de excedencia expresada en función de la magnitud se tiene:

$$\lambda_{y*}(m_j) = P[M = m_j] \sum_{i=1}^{N_S} \sum_{k=1}^{N_R} v_i P[Y > y^* | m_j, r_k] P[R = r_k] \quad (2.11)$$

De manera similar, Kramer (1996) describe la tasa anual de excedencia expresada en función de la distancia a la fuente según:

$$\lambda_{y*}(r_k) = P[R = r_k] \sum_{i=1}^{N_S} \sum_{j=1}^{N_M} v_i P[Y > y^* | m_j, r_k] P[M = M_j] \quad (2.12)$$

Finalmente, es posible calcular la tasa anual de excedencia como función de la magnitud del sismo y de la distancia de sitio a fuente según:

$$\lambda_{y*}(m_j, r_k) = P[M = m_j] P[R = r_k] \sum_{i=1}^{N_S} v_i P[Y > y^* | m_j, r_k] \quad (2.13)$$

Donde $\lambda_{y*}(m_j, r_k)$: es la densidad de probabilidad condicional conjunta de M y R para un valor de intensidad sísmica y^* ; N_S es el número total de fuentes sísmicas y v_i es la tasa de actividad para la fuente sísmica, i .

En la figura 2.4 se puede observar un ejemplo de desagregación de magnitud y distancia realizada para Ometepec, para un periodo espectral de 0.2 s y amplitud espectral de 1.15 g, realizada para el caso de estudio 2 (con $r=320$ km) utilizando la ecuación de atenuación de Atkinson y Boore (2003). Es posible observar la variación de tres parámetros Magnitud,

Distancia y Densidad de probabilidad. El resultado de este proceso permite deducir que magnitudes o distancias a la fuente que aportan con mayor porcentaje, de esta manera es posible seleccionar, con bases solidas, acelerogramas del sitio que representen esas variables.

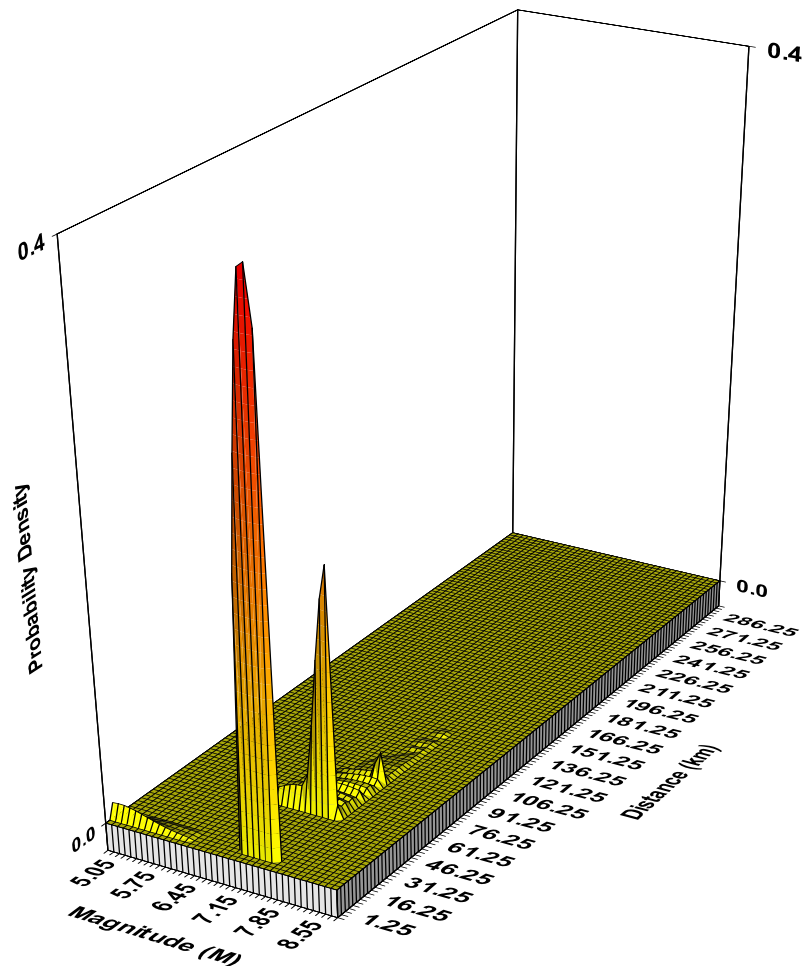


Figura 2.4 Ejemplo de desagregación del peligro sísmico para un periodo espectral de 0.2 s y amplitud espectral de 1.15 g

2.5.2. Metodologías para escalar Acelerogramas

Para realizar el escalamiento de acelerogramas se cuenta con diferentes metodologías desarrolladas (Silva y Lee, 1987; Carballo y Cornell, 2000; Naeim *et al.*, 2004; Iervolino y Cornell, 2005; Fahjan y Ozdemir, 2008), se pueden mencionar los trabajos de: Shome *et al.* (1998), mostraron que escalar los registros con base en la aceleración espectral produce menos dispersión en la respuesta estructural. Watson-Lamprey y Abrahamson

2.5. OBTENCIÓN DE ACELEROGRAMAS A PARTIR DE ESPECTROS DE PELIGRO UNIFORME (EPU)

(2006), mostraron que la demanda de deformación esta relacionada directamente con el factor de escala utilizado, relacionando el acelerograma con respecto a algún parámetro sísmico (PGA, PGV o intensidad de Arias). Las técnicas convencionales generalmente proponen modificar las amplitudes del registro a un valor objetivo, que puede ser el valor de la ordenada espectral en el periodo fundamental o al PGA del espectro de peligro uniforme. Otra metodología muy utilizada es en la que se escalan cada uno de los componentes del acelerograma para que su ordenada máxima sea igual a la aceleración máxima del terreno, asociada a un periodo de retorno dado.

Para este trabajo se recurrió a la metodología de escalamiento de acelerogramas en función de su espectro de pseudo-aceleración elástico, de manera que se ajusten con los EPU hallados en este trabajo, técnica ampliamente conocida como *Spectral Matching*, *SM* (ajuste de espectros). Existen tres metodologías para realizar el ajuste con el espectro:

- Método en el dominio de la frecuencia, este método ajusta la amplitud del espectro de Fourier en base a la relación del espectro del evento semilla y el espectro objetivo. Es un proceso iterativo hasta alcanzar el ajuste con el espectro de diseño para cierto rango de periodos, un mayor número de iteraciones resulta en una mejor compatibilidad con el objetivo (Fahjan y Ozdemir, 2008). Existen dos desventajas de este método: en general no se tiene buena convergencia con el espectro objetivo y a menudo se altera el carácter no estacionario del registro de aceleración a tal grado que ya no parece un registro sísmico real.
- Método en el dominio de la frecuencia con teoría de vibración aleatoria (random vibration theory, RVT), utiliza la teoría de vibración aleatoria (pulsos generados aleatoriamente) para hacer grandes ajustes iniciales a las amplitudes del espectro de Fourier del acelerograma semilla, y posteriormente para ajustes de menor escala se continua con el método anterior, en el dominio de la frecuencia. Este método en general cambia el carácter de desplazamientos del registro sísmico, pero obtiene buenos resultados en términos de aceleración y velocidad (Al Atik y Abrahamson, 2010)
- Método de ajuste de espectros en el tiempo, *Spectral Matching in Time Domain* el cual según Fahjan y Ozdemir (2008): se trata de ajustar el registro original iterativamente en

el dominio del tiempo hasta alcanzar compatibilidad con algún espectro de aceleración seleccionado (o un espectro de respuesta de aceleración) añadiendo *Wavelets*, teniendo rangos específicos de periodo y limitando la duración del acelerograma de entrada. Dichos paquetes de *Wavelets* se adhieren en segmentos de tiempo donde existen diferencias de amplitud entre los espectros en rangos de periodo modificando así el acelerograma inicial. El método preserva, en todas sus fases, las características del registro inicial (duración, arribo de ondas S y P, etc.) y debido a que se trata de un fenómeno no estacionario, no se obtienen variaciones sustanciales en el contenido de frecuencia del movimiento del suelo. El espectro elástico de aceleración de los registros resultantes debe ser coincidente (con cierta tolerancia) con el espectro objetivo fijado inicialmente, en este trabajo se utilizaron los EPU para un periodo de retorno seleccionado. Este procedimiento fue propuesto inicialmente por Kaul (1978) y fue extendido para realizarlo con múltiples espectros por Lilhanand y Tseng (1987).

A pesar de que este método es más complicado que los métodos de Ajuste de espectros (SM) en el dominio de la frecuencia, en muchos casos logra preservar las características no estacionarias del registro sísmico de entrada. Abrahamson (1992) desarrolló el programa de computador RspMatch que permite preservar las características no estacionarias del registro sísmico de referencia para un gran rango de acelerogramas. En este estudio se utilizará la metodología mencionada, ampliamente desarrollada por Al Atik y Abrahamson (2010) e implementada en el programa RspMatch 2009, que incluye una función de ajuste y corrección al funcional de forma otorgando mayor estabilidad y eficiencia en la solución, sin introducir distorsiones en las velocidades y desplazamientos (incluye la corrección por línea base) asegurando la convergencia de la solución en la gran mayoría de los casos.

El escalamiento debe ser congruente con el peligro sísmico aceptado para el sitio. Si se sigue un proceso donde se escalan los espectros de respuesta de las dos componentes horizontales de algún evento sísmico, la diferencia de la suma de los cuadrados (SRSS) de estos espectros con un espectro de diseño (puede ser un espectro de diseño paramétrico, un EPU o un espectro condicional medio CMS) no debe ser mayor que un parámetro α (Naeim *et al.*, 2004), para

2.5. OBTENCIÓN DE ACELEROGRAMAS A PARTIR DE ESPECTROS DE PELIGRO UNIFORME (EPU)

un intervalo de periodos T_o a T_f ; según NIST (2011) el intervalo va de $0.2T_1$ a $3T_1$ para edificios con marcos a momento y $0.2T_1$ a $2T_1$ para edificios con muros de corte o con contravientos donde T_1 es el periodo traslacional fundamental de la estructura para las dos direcciones horizontales del edificio, los valores de α van de 1.3 a 1.4 para estructuras típicas y regulares, sin embargo, para estructuras especiales o con aislamiento sísmico incluido, los rangos de escalamiento son mayores y se debe recurrir a técnicas más refinadas.

Por todo lo mencionado anteriormente, muchos de los temas tratados por sí solos son temas extensos de investigación, por ello en este trabajo se acotaron los procedimientos a utilizar, delimitando las variables que generan mayor incertidumbre. Entonces, la metodología que se utilizó comprende:

- Para la interpolación de los Espectros de Peligro Uniforme (EPU) se utilizó el Método de Ponderación de la Distancia Inversa (IDW por sus siglas en inglés; Shepard (1968)), se siguió un proceso iterativo hasta validar los resultados como se indica a continuación:
 1. Después de seleccionar una ciudad de referencia para el estudio de peligro sísmico (representada por un punto con coordenadas geográficas), se estudiaron las fuentes sísmicas y relaciones de movimiento fuerte del terreno necesarias para encontrar los EPU, considerando diferentes periodos de retorno.
 2. Para diferentes coordenadas de la región (con diferentes distancias de la ciudad de referencia definida en el paso 1) se encontraron los EPU respectivos (considerando las fuentes sísmicas correspondientes y leyes de atenuación adecuadas).
 3. Con los EPU obtenidos en el paso 2, se procedió a realizar la interpolación por el método IDW descrito en la sección 2.4.1, encontrando el EPU interpolado para las coordenadas de la ciudad de referencia definida en el paso 1. El proceso de interpolación resulta iterativo, debido a que se debe calibrar el parámetro de potencia p de manera que se obtenga la mejor aproximación de resultados.
 4. El EPU interpolado (paso 3) se validó y comparó con el EPU calculado para las coordenadas de Ometepéc (paso 1), de esta manera se calcularon los porcentajes

de error como la diferencia porcentual de las aceleraciones espectrales del EPU calculado para Ometepe y las aceleraciones espectrales de los EPU interpolados.

- Para obtener acelerogramas reales y representativos del sitio en estudio, se realizó una desagregación de las variables que contribuyen al Peligro Sísmico de un sitio en particular, para cierto periodo representativo que corresponde a una ordenada de aceleración espectral. De esta manera se obtuvieron los acelerogramas semilla, y luego se aplicó la técnica de Ajuste de Espectros (*Spectral Matching*, SM) en el dominio del tiempo.
- Por último la selección de los acelerogramas a estudiar se basó en la compatibilidad con el espectro de peligro uniforme, más que con parámetros sísmicos. Se procedió a ajustar el acelerograma seleccionado en el dominio del tiempo, para que su espectro de respuesta de aceleración empate correctamente al EPU estudiado, finalmente se revisó:
 1. Que los acelerogramas obtenidos posean características reales de un movimiento sísmico en términos de su amplitud, contenido de frecuencia y duración, ya que la técnica utilizada no afectó el carácter no estacionario del movimiento.
 2. En algunos casos se realizó una corrección por línea base y filtrado a los acelerogramas resultantes.
 3. Los registros de aceleración, velocidad y desplazamiento resultantes se examinaron para asegurarse que estuvieran razonablemente cercanos a los valores objetivo en términos de valores pico, forma de ondas, duración del movimiento fuerte y otros factores críticos como los pulsos de velocidad debido a la cercanía de la fuente.
 4. Se compararon los espectros de Fourier y las curvas de porcentaje de intensidad de Arias de los acelerogramas semilla y los ajustados, considerando que las variaciones en forma en ambos casos deben ser mínimas, es decir la forma se conserva antes y después del ajuste.



3 Caracterización de las Fuentes sismogénicas para la ciudad de Ometepec, Guerrero

Dicen que la Tierra tenía fiebre y que tembló.

Shakespeare, Macbeth, II

Un factor clave para la evaluación del peligro sísmico es definir, con base en estudios sismológicos y de ciencias afines como la geología y otras, los factores que influyen en la sismicidad de la región seleccionada. A pesar de que este proceso no pueda brindar resultados exactos, debido al gran número de variables implicadas, se estudia el potencial sísmico de las posibles fuentes que afecten a la región de estudio. Debe entenderse que la probabilidad de ocurrencia de un sismo no es igual en todas las regiones de la Tierra, por lo que resulta importante identificar las fuentes sísmicas asociadas a la región de manera particular (Nava, 1987).

3.1. Catálogo de sismicidad regional

La República Mexicana, incluyendo su mar territorial, se encuentra repartida entre cinco placas tectónicas: la de Norteamérica, que incluye México hasta el Ártico; la del Pacífico, que incluye parte de México, EE.UU. y casi todo el Pacífico del norte, que son las más grandes. El Sur de Chiapas está dentro de la placa del Caribe, la cual también incluye la mayoría de los países de Centro América y las islas caribeñas. después, se incluye una placa oceánica de tamaño mediano, la placa de Cocos que ocupa parte del Océano Pacífico que se encuentra frente a las costas Mexicanas y de Centroamérica y por último, la placa de Rivera, que se

CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN DE LAS FUENTES SISMOGÉNICAS PARA LA CIUDAD DE OMETEPEC, GUERRERO

encuentra en la boca del Golfo de California, la distribución de estas placas tectónicas se muestra en la figura 3.1.

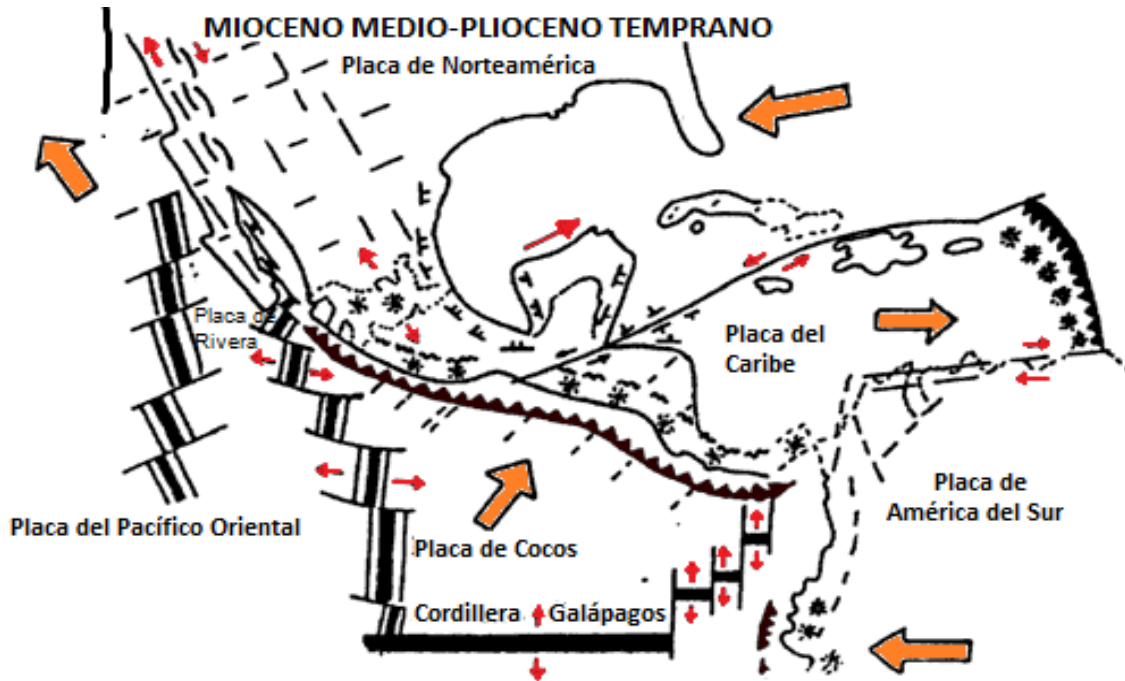


Figura 3.1 Placas tectónicas de la República Mexicana (Nava, 1987).

La mayoría de los sismos se generan a lo largo de las fronteras entre las placas tectónicas. En la figura 3.2 se muestran epicentros de sismos que han afectado a México en el siglo XX (Kostoglodov y Pacheco, 1999). Estos se localizan frente a las costas del Océano Pacífico y son producto de la subducción de la placa oceánica bajo la placa continental. Las placas de Cocos y de Rivera se introducen por debajo de la placa de Norteamérica (proceso conocido como Subducción); el movimiento relativo entre estas placas genera uno de los peligros sísmicos y volcánicos más altos del mundo.

Los eventos sísmicos ocurridos en México se generan a lo largo de la falla o en contacto entre dichas placas, a esta zona se le conoce como Fosa Mesoamericana. Sin embargo, algunos sismos suceden al interior del continente, en regiones alejadas de estas fronteras tectónicas, principalmente a lo largo de la faja volcánica, donde se concentra la mayor población de México.

3.1. CATÁLOGO DE SISMICIDAD REGIONAL

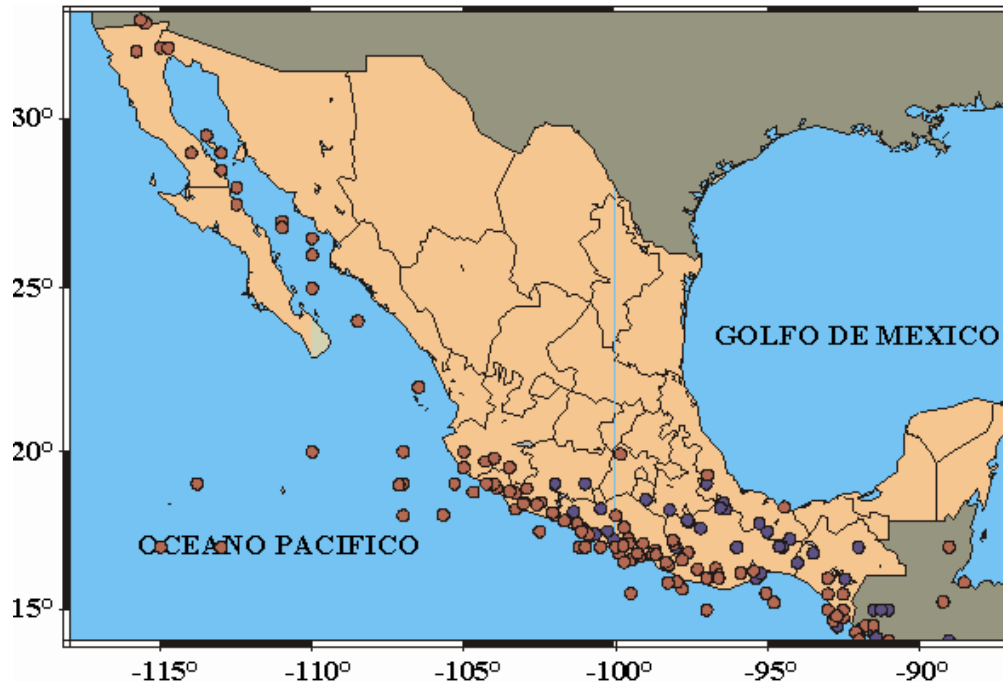


Figura 3.2 Sismos moderados y grandes en México, el catalogo del siglo XX (Kostoglodov y Pacheco, 1999).

La actividad sísmica puede explicarse como (Jaimes y Reinoso, 2001):

- **Sismos de subducción:** En este caso el mecanismo de falla principal es el de falla inversa y se presentan a lo largo de los límites de convergencia de las placas. En México esta interacción se presenta entre las placas de Rivera y la de Norteamérica; también entre las placas de Cocos y de Norteamérica esta interacción abarca la mayor parte de la costa del Pacífico; y finalmente en el límite entre las placas de Cocos y del Caribe, al sureste de México. En la figura 3.3 se muestra la zona de subducción para los estados de Guerrero y Oaxaca, también se muestra la localización de algunos sismos interplaca importantes en las regiones.

Jaimes y Reinoso (2001) observaron que ciertos segmentos de la zona de subducción del territorio tienen periodos de recurrencia de 30 a 40 años para sismos de magnitud 7.5 o mayor. Estos periodos de recurrencia son relativamente cortos comparados con otras zonas de subducción en el mundo. Estos sismos no sólo se producen con mayor frecuencia, sino que también son de los mayores sismos registrados en México; por su cercanía a las costas representan un grave peligro para las poblaciones allí localizados.

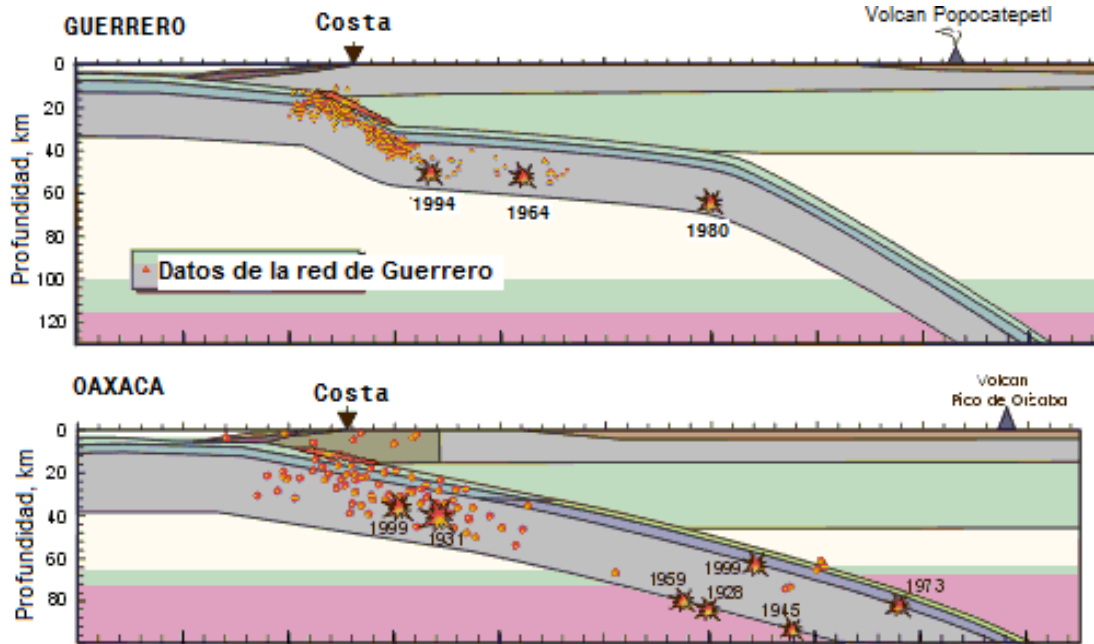


Figura 3.3 Estructura de la zona de Subducción y localización de sismos. Para los Estados de Guerrero y Oaxaca (Kostoglodov V. y Pacheco J. F., 1999).

- **Sismos de falla normal:** Ocurren a profundidades mayores a 50 Km, afectan sobre todo a las ciudades asentadas a lo largo de la faja volcánica. Estos sismos se localizan dentro de las placas oceánicas que se subducen bajo el continente. A pesar de que la magnitud de estos sismos rara vez llega a sobrepasar de 7.0 y su ocurrencia es mucho más esporádica que los sismos de la costa, por la ubicación de la fuente y la cercanía de las grandes poblaciones, estos sismos representan uno de los mayores peligros en México.

En la figura 3.4, se muestra un corte del cambio de pendiente de la placa de Cocos ya subducida, este cambio es a lo largo de la zona de subducción en la parte central de México; la placa de Cocos subducida cambia hasta una profundidad de aproximadamente 50 km y su ángulo de subducción es pequeño (aproximadamente 15°), este cambio es importante ya que, a menor pendiente, mayor es la probabilidad de que ocurran sismos de falla normal e intraplaca que afecten a distintos lugares de México. En la porción sureste de México, ocurren sismos de profundidades de hasta 120 km y el ángulo de subducción se incrementa hasta 45° , y la probabilidad de que este tipo de sismos afecten a algunos lugares de México disminuye.

3.1. CATÁLOGO DE SISMICIDAD REGIONAL

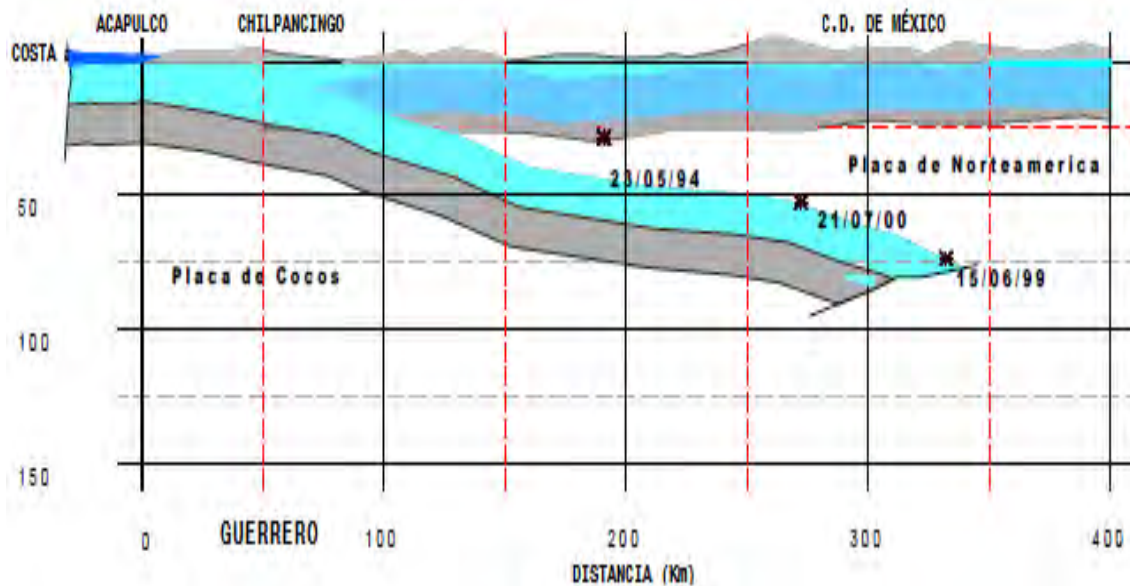


Figura 3.4 Cambios en la placa de cocos en la que se puede observar la ubicación de sismos de falla normal e intraplaca, Guerrero - Cd. de México (Jaimes y Reinoso, 2001).

- **Sismos de intraplaca:** Son los que se originan en el interior de la placa Norteamericana, a profundidades no mayores de los 30 km y por lo general presentan mecanismos de falla normal; pueden tener algunos mecanismos de tipo compresivo y también pueden estar asociados a volcanes. Estos sismos ocurren ocasionalmente en todo el mundo, y son causados por esfuerzos acumulados de presiones desarrolladas en la frontera de las placas. Pueden alcanzar magnitudes tan grandes como 6.5 y son ricos en energía de alta frecuencia; pueden causar grandes y severos daños a las poblaciones cercanas al epicentro por su poca profundidad o a pequeñas edificaciones, que usualmente no son afectadas por sismos grandes y distantes, como el sismo ocurrido el 23 de Mayo de 1994 en el estado de Guerrero.

Otros sismos significativos que han ocurrido en México durante este siglo son los Sismos Corticales. Estos eventos ocurren dentro de la placa Norteamericana, son sismos Intraplaca muy superficiales (no llegan a sobrepasar los 35 kilómetros de profundidad). Sus magnitudes son considerablemente menores a las de los sismos de subducción, incluso menores a la de los sismos profundos; sin embargo, debido a que son superficiales y ocurren principalmente a lo largo del Eje Volcánico Mexicano,

CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN DE LAS FUENTES SISMOGÉNICAS PARA LA CIUDAD DE OMETEPEC, GUERRERO

donde se concentra la mayoría de la población en el país, pueden provocar graves daños. El sismo de Acambay de 1912 tuvo una magnitud de 7.0 y ocasionó grandes daños en los pueblos de Acambay y Tixmadejé en el estado de México, además provocó algunos daños en la ciudad de México.

3.2. Sismicidad local

En la tabla 3.1 se presenta un resumen de la sismicidad histórica del estado de Guerrero y parte del estado de Oaxaca, los epicentros de los sismos abarcan un área de 16°Latitud N, 103°Longitud W; 18.5°Latitud N, 97°Longitud W. Se incluyen epicentros de sismos con magnitudes mayores a 6.5, dentro del área estudiada se encuentra ubicado el municipio de Ometepec (Lat: 16°41' 7.57"N, Long: 98°24' 19.14"W). En la tabla se resaltan los eventos sísmicos de mayor magnitud.

Es posible observar, a partir de la sismicidad histórica, que la región se caracteriza por movimientos con profundidades someras a profundas, y pocos eventos corticales como el de 1902 y el de 1950. Los mecanismos de falla han sido de tipo normal e inverso, debido a los sismos de subducción, sobre todo en la costa de Guerrero. En el Estado de Guerrero se registra alrededor del 25 % de la sismicidad que ocurre en el territorio mexicano (Gama, 2010). Los eventos más cercanos a la región de Ometepec, resaltados con negritas en la tabla 3.1, han presentado magnitudes mayores a 7, con excepción del sismo de 1945.

3.3. Potencial sísmico

La región de Ometepec se encuentra en una zona de subducción, la cual ha sido definida por estudios de sismicidad, que describen mecanismos de liberación y acumulación de energía asociados a ciclos largos de sismos interplaca ($M_s \geq 7$) (González-Ruiz y McNally, 1988). Existen varios sismos poco profundos ocurridos en el siglo XX: el sismo de 1890 ($M_s = 7.2$), 1937 ($M_s = 7.5$), 1950 ($M_L = 6.8$), los eventos dobles con mecanismo de falla inversa de 1982 ($M_s = 7$), 1995 ($M = 7.2$) y recientemente el sismo del 2012, ($M_W = 7.4$). Los epicentros y las réplicas de los sismos de 1937, 1950, 1982 y 2012 se encuentran casi superpuestos, se sugiere que el mismo segmento de subducción en la zona se rompió durante

3.3. POTENCIAL SÍSMICO

estos eventos (Juárez *et al.*, 2012).

AÑO	MES	DIA	TIEMPO UTC (hhmmss.mm)	LAT Grados	LONG Grados	MAGNITUD (Varias)	PROF (km)	CATÁLOGO
-	-	-	-	Grados	Grados	(Varias)	(km)	-
1820	5	4	-	17.2	-99.6	7.6	-	(2)
1845	4	7	220000.00 (1)	16.6	-99.2	7.9	-	(2)
1874	3	16	-	17.7	-99.1	7.3	-	(2)
1882	7	19	-	17.7	-98.2	7.5	100	(2)
1887	5	29	-	17.2	-99.8	7.2	-	(2)
1889	9	6	-	17	-99.7	7.0	-	(2)
1890	12	2	-	16.7	-98.6	7.2	30 (3)	NOAA
1894	11	2	-	16.5	-98	7.4	-	(2)
1899	1	24	234300.00	17	-100.5	7.9	60	NOAA
1902	1	16	231900.00	17.62	-99.72	7.0	0	(2)
1907	4	15	060800.00	17	-99.72	7.0	25	NOAA
1908	3	26	230300.00	16.7	-99.2	7.5	33	(2)
1909	7	30	105100.00	16.8	-99.72	7.2	33	(2)
1911	12	16	191400.00	16.9	-100.7	7.6	50	NOAA
1928	2	10	043900.00	17.706	-98.218	6.5	65	(3)
1928	10	9	030100.00	16.34	-97.29	7.6	-	NGDC
1928	4	17	032600.00	17.8	-97.1	7.7	100	NGDC
1937	12	23	131800.00	17.1	-98.07	7.5	33 (2)	NGDC
1941	4	15	191000.00	18.85	-102.94	7.7	-	NGDC
1943	2	22	092000.00	16.7	-101.5	7.5	60	NOAA
1945	8	11	165200.00	17.926	-97.569	6.5	65	(3)
1948	1	6	172300.00	16.756	-98.939	6.7	18	(3)
1948	1	6	172500.00	16.776	-98.985	6.7	18	(3)
1950	11	17	192800.00	16.5	-100.4	6.8	0	(6)
1950	12	14	141500.00	16.299	-98.2	7.5	50	NOAA
1956	1	8	071100.00	16.9	-99.6	6.5	-	NOAA
1957	7	28	084000.00	16.76	-99.354	7.5	18	(3)
1962	5	11	141100.00	17	-99.6	7.0	40	NOAA
1962	5	19	145800.00	17.2	-99.5	7.1	33	NOAA
1964	7	6	072200.00	18.3	-100.4	7.4	55 (2)	NOAA
1965	12	9	060700.00	17.24	-100.07	6.5	65	NOAA
1968	8	2	140600.00	16.5	-97.8	7.5	40	NOAA
1973	1	30	210100.00	18.5	-103	7.5	43	NOAA
1975	4	23	111448.00	16.447	-98.91	6.5	11	PDE
1976	6	7	142600.00	17.4	-100.7	6.4	48	NOAA
1978	3	19	013914.00	17.026	-99.735	6.6	36	PDE

CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN DE LAS FUENTES SISMOGÉNICAS PARA LA CIUDAD DE OMETEPEC, GUERRERO

AÑO	MES	DIA	TIEMPO UTC	LAT	LONG	MAGNITUD	PROF	CATÁLOGO
-	-	-	(hhmmss.mm)	Grados	Grados	(Varias)	(km)	-
1979	3	14	110700.00	17.8	-101.3	7.4	25	(2)
1980	10	24	145300.00	18.2	-98.2	6.8	65	NOAA
1981	10	25	032200.00	18.2	-102	7.3	21	(2)
1982	6	7	065237.37	16.404	-98.336	7.0	18	(3)
1982	6	7	105940.16	16.415	-98.467	7.0	19	(3)
1984	7	2	045044.13	16.804	-98.441	6.5	46	PDE
1985	9	19	131747.35	18.42	-102.46	8.1	15	(2)
1985	9	21	013713.47	17.82	-101.68	7.6	17	(2)
1986	4	30	070718.12	18.404	-102.973	7.0	26	PDE
1987	7	15	071613.55	17.522	-97.153	6.5	67	PDE
1989	4	25	142900.00	16.8	-99.3	7.3	21	NOAA
1993	10	24	075200.00	16.8	-98.7	6.7	21	NOAA
1994	5	23	014142.29	18.165	-100.527	6.3	55	PDE
1994	12	10	161738.51	18.136	-101.384	6.5	48	PDE
1995	9	14	140431.43	16.779	-98.597	7.2 (4)	23	PDE
1996	7	15	212334.08	17.6	-100.965	6.8	18	PDE
1997	1	11	202826.02	18.219	-102.756	7.2	33	PDE
1997	7	19	142208.75	16.333	-98.216	6.9	33	PDE
1999	6	15	204205.93	18.386	-97.436	7.0	39	(2)
1999	6	21	174304.52	18.324	-101.539	6.3	68	PDE
2000	8	9	114147.9	18.198	-102.48	6.5	45	PDE
2002	4	18	050246.19	16.985	-100.865	6.8	24	PDE
2004	1	1	233150.05	17.488	-101.303	6.1	29	PDE
2007	4	13	054223.03	17.302	-100.198	6.0	34	PDE
2010	6	30	072227.69	16.396	-97.782	6.3	20	PDE
2011	12	11	014725.9	17.844	-99.963	6.5	54	PDE-W
2012	3	20	180247.44	16.493	-98.231	7.4	15	(5)
2012	4	11	225510.25	18.229	-102.689	6.5	20	PDE-Q

Tabla 3.1 Catálogo de sismicidad histórico. Los catálogos corresponden a información obtenida de la USGS. NGDC: National Geophysical Data Center. NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration. PDE: Preliminary Determination of Epicenters. Referencias (1): Hora GMT. (2): Información obtenida de Singh L. Astiz y J. Havskov (1981); Kostoglodov y Pachecho (1999). (3): González-Ruíz J.R. y McNally K.C. (1988); Nuñez Conrú F. J. (1996). (4): Sordo y otros (1995). (5): Juárez y otros (2012). (6): Figueroa (1970). Las referencias (2) a (6) utilizaron información del Servicio Sismológico Nacional para la localización de sismos.

3.3. POTENCIAL SÍSMICO

Se han identificado (González-Ruiz y McNally, 1988) sismos principales con profundidad intermedia en la región de Ometepec, los cuales son: 1882 ($M = 7.5$), 1928 ($M = 7.6$), 1945 ($M_{GR} = 6.5$) y 1980 ($M_S = 6.8$). Las fuentes sísmicas de estos movimientos se han encontrado a más de 60 km característicos de fallas normales. Se puede observar que:

- Los eventos principales, poco profundos ($h \leq 35$ km) con mecanismos de falla inversa, han roto el mismo segmento de la zona de subducción de Ometepec.
- A pesar de las similitudes en profundidad de foco y geometría de la fuente, los eventos interplaca poco profundos en la región, han presentado marcadas diferencias en sus magnitudes, intervalos de recurrencia e incluso mecanismo de falla. Esta información permite reconocer la variabilidad de los modos de ruptura de la interface entre las placas de Cocos y Norteamericana.
- Los movimientos profundos con mecanismos de falla normal han precedido todos los eventos de tipo someros con mecanismos de falla inversa.

Las dimensiones de ruptura de sismos pasados, generalmente son utilizadas para definir los gaps sísmicos (González-Ruiz y McNally, 1988). Los cuales son importantes para predicciones a largo plazo de eventos principales a lo largo de bordes de placa. La zona de subducción de México se extiende a lo largo del Oeste de México entre la longitud 92°W y 106°W , definida por la interacción de las placas de Cocos, Rivera, y Norteamérica (Nishenko y Singh, 1987). Con base en la sismicidad histórica a lo largo de la zona de subducción mexicana, Nishenko y Singh (1987) han estudiado los intervalos de recurrencia de 13 segmentos característicos del país. Estos segmentos se muestran en la figura 3.5 y se explican en los siguientes párrafos según Nishenko y Singh (1987):

- Oaxaca**
- *Oaxaca Este* (OX-E): Entre longitudes 95.2°W a 96.4°W . En este segmento los sismos ocurridos incluyen: 22 Marzo 1928, $M_S=7.7$ y el de 23 de Agosto de 1965, $M_S=7.8$.
 - *Oaxaca Central* (OX-CI y OX-CII): Entre longitudes 96.4°W a 97.7°W . En este segmento los principales sismos ocurridos incluyen: 11 de Mayo 1870, $M_S= 7.9$; 27 de Marzo 1872, $M_S = 7.4$; 17 de Junio 1928, $M_S = 8.0$; 9 de Octubre

CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN DE LAS FUENTES SISMOGÉNICAS PARA LA CIUDAD DE OMETEPEC, GUERRERO

1928, $M_s = 7.8$; 29 de Noviembre 1978, $M_s = 7.8$; 30 de Septiembre de 1999, $M = 7.5$. Esta región, abarca en realidad, dos zonas: la primera (OX-CI) entre 96.4°W y 97.3°W y la segunda (OX-CII) entre 97.3°W y 97.7°W . En el primer segmento son característicos los movimientos de Junio de 1928 y el de 1978.

- *Oaxaca Oeste* (OX-O): Entre longitudes 97.7°W a 98.2°W . En este segmento los principales sismos ocurridos incluyen: 5 de Mayo 1854, $M_s = 7.7$; 2 de Noviembre 1894, $M_s = 7.4$; 4 de Agosto 1928, $M_s = 7.6$; y 2 de Agosto de 1968 $M = 7.5$. Con excepción del sismo de 1894, todos tuvieron zonas de alta intensidad que coinciden espacialmente.

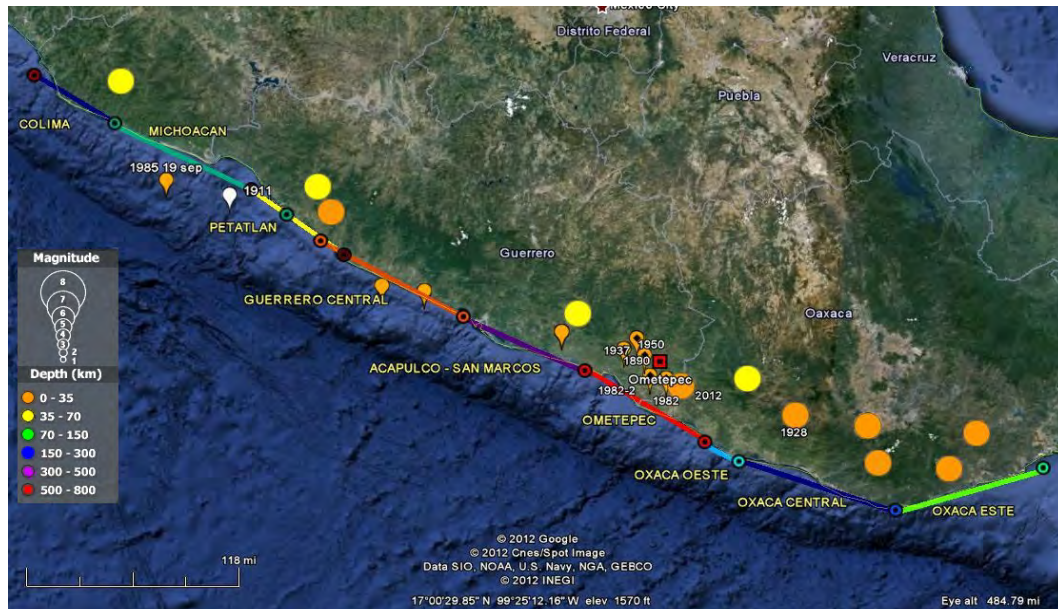


Figura 3.5 Segmentos de ruptura en la zona de subducción mexicana.

- Guerrero**
- *Ometepec* (OM): Entre longitudes 98.2°W a 99.3°W . En este segmento los principales sismos ocurridos incluyen: 2 de Diciembre 1890, $M_s = 7.5$; 15 de Abril 1907, $M_s = 7.9$; 23 de Diciembre 1937, $M_s = 7.5$; 14 de Diciembre 1950, $M_s = 7.3$; 2 de Agosto de 1968, $M = 7.5$; los eventos dobles de 7 de Junio 1982, $M_s = 6.9$ y 7; 14 de Septiembre 1995, $M = 7.2$. Recientemente, el sismo del 20 de Marzo de 2012, $M = 7.4$, se puede incluir en este segmento (Juárez *et al.*, 2012). Este segmento fue clasificado como un gap por Singh *et al.* (1981), con base en el lapso de tiempo transcurrido antes de un sismo de

3.3. POTENCIAL SÍSMICO

gran magnitud, se caracteriza por tener modos de ruptura tanto simples como complejos, con diferencias de magnitud considerables. El segmento Ometepec es de aproximadamente 120 km de largo y con sismos de magnitudes en rango de $6.5 \leq M_s \leq 7.5$. Se considera que los movimientos interplaca del segmento están asociados a fallas profundas de tipo normal y otros movimientos de profundidades someras a intermedias (González-Ruiz y McNally, 1988).

- *Acapulco San Marcos* (AC-SM): Entre longitudes 99.3°W a 100°W . En este segmento los principales sismos ocurridos incluyen: 4 de Mayo 1820, $M_s = 7.6$; 7 de Abril 1845, $M_s = 7.9$; 15 de Abril 1907, $M_s = 7.9$; 28 de Julio 1957, $M_s = 7.7$; 11 y 19 de Mayo de 1962, $M = 7.2$ y el del 25 de Abril de 1989, $M = 7.1$. Los eventos de 1907 y 1957 rompieron la misma porción de interface de placa, y el evento de 1907 pudo haber roto también el segmento Ometepec.
- *Guerrero Central* (GC): Entre longitudes 100°W a 101°W . En este segmento los principales sismos ocurridos incluyen: 7 de Abril 1845, $M_s = 7.9$; 24 de Diciembre 1899, $M_s = 7.7$; 26 de Marzo 1908, $M_s = 7.8$; 30 de Julio 1909, $M_s = 7.5$; y 16 de Diciembre 1911, $M_s = 7.8$. Esta zona se caracteriza por tener los lapsos de tiempo mas grandes antes de los sismos mas grandes ocurridos a lo largo de la zona de subducción mexicana.
- *Petatlán* (PE): Entre longitudes 101°W a 101.8°W . En este segmento los principales sismos ocurridos incluyen: 22 de Febrero 1943, $M_s = 7.7$ y 14 de Marzo 1979, $M_s = 7.6$. En contraste con los movimientos de Oaxaca, en este segmento existe variedad en los modos de ruptura.

Michoacán ■ *Michoacán* (MI): Entre longitudes 101.5°W a 103°W . Este segmento, al igual que el gap de Tehuantepec, coincide con la intersección de una característica batimétrica, la zona de fractura de Orozco con la parte media de la trinchera Americana. La ocurrencia del sismo del 19 de Septiembre de 1985 con $M_s = 8.1$, indica que este gap tiene un modelo de grandes movimientos poco frecuentes. Se ha identificado a un evento previo, el del 7 de junio de 1911 con $M_s = 7.9$. Lo que indica grandes lapsos de tiempo entre eventos.

CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN DE LAS FUENTES SISMOGÉNICAS PARA LA CIUDAD DE OMETEPEC, GUERRERO

- *Colima (CO)*: Entre longitudes 103°W a 103.7°W . Entre los eventos sísmicos asociados a este segmento se encuentran el del 15 de Abril de 1941 con $M_s = 7.9$ y el del 30 de Febrero de 1973 con $M_s = 7.5$.

Para las fuentes sísmicas, la tabla 3.2 muestra la ubicación de las fallas estudiadas, indicando en coordenadas geodesicas la Longitud $^{\circ}\text{W}$ del punto inicial y final que abarca el segmento de falla; y la tabla 3.3 muestra las tasas de recurrencia utilizadas en el peligro sísmico de la zona.

Segmento	Sigla	Tipo	Tipo	Falla	Ubicación (Long. $^{\circ}\text{W}$)
Oaxaca Este	OX-E	Subducción	Inter-placa	Normal	95.2 a 96.4
Oaxaca Central I	OX-CI	Subducción	Inter-placa	Normal	96.4 a 97.3
Oaxaca Central II	OX-CII	Subducción	Inter-placa	Normal	97.3 a 97.7
Oaxaca Oeste	OX-O	Subducción	Inter-placa	Normal	97.7 a 98.2
Ometepec	OM	Subducción	Inter-placa	Normal/Inversas	98.2 a 99.3
Acapulco- San Marcos	AC-SM	Subducción	Inter-placa	Normal	99.3 a 100
Guerrero Central	GC	Subducción	Inter-placa	Normal	100 a 101
Petatlán	PE	Subducción	Inter-placa	Normal	101 a 101.8
Michoacán	MI	Subducción	Inter-placa	Normal	101.5 a 103
Colima	CO-I	Subducción	Inter-placa	Normal	103 a 103.7

Tabla 3.2 Ubicación de las fallas sísmicas

No.	Sigla	Longitud	Ancho	$M_o \cdot 10^{27}$ dyna-cm	Tasa de recurrencia		Mmin	Mmax	Mprom	Σ/prom
		km	km		veces/año	años				
1	OX-E	137	80	1.7	3.93E-02	25	7.2	7.5	7.35	0.13
2	OX-CI	142	80	3.2-3.5	1.90E-02	53	7.2	7.8	7.5	0.3245
3	OX-CII			1.8	3.80E-02	26	7.4	7.9	7.65	0.9
4	OX-O	37.5	80	1	2.94E-02	34	7.4	7.7	7.55	0.3245
5	OM	120	80	5.8	5.75E-02	17	7	7.9	7.45	0.416
6	AC-SM	113	80	3.95	1.77E-02	56	7.2	7.8	7.5	0.3245
7	GC	139	80	2	2.68E-02	37	7.23	7.83	7.53	0.3245
8	PE	102	80	1.6	2.90E-02	34	7.2	7.8	7.5	0.3245
9	MI	133	80	3.8	1.35E-02	74	7.2	7.8	7.5	0.3245
10	CO-I	54.05	80	2.5	7.20E-03	139	7.2	7.8	7.5	0.3245

Tabla 3.3 Caracterización de las fallas sísmicas

3.4. Caracterización de las Fuentes sismogénicas

Para el estudio del peligro sísmico en la región se consideraron dos tipos de fuentes capaces de generar sismos: fuentes tipo falla y fuentes tipo área sismogénicas (realmente volumétricas por naturaleza). Las fallas activas se modelan con superficies tridimensionales (o bidimensionales) y los detalles de su comportamiento son incorporados en la caracterización de la fuente sísmica. Las zonas tipo área sismogénicas, son regiones donde los sismos se suponen ocurren aleatoriamente. Las fuentes sísmicas se modelan en el análisis de peligro en términos de geometría y recurrencia sísmica.

3.4.1. Fuentes tipo Falla para la región de Ometepec, Guerrero

Para definir las fuentes tipo falla, se ha identificado, localizado, y estudiado la geometría de fuentes sísmicas. Y de acuerdo con los segmentos de falla descritos por Nishenko y Singh (1987), se consideraron tres áreas geográficas de influencia, formadas por tres círculos con radios de 200 km (línea rosa), 320 km (línea amarilla) y 500 km (línea roja), mostrados en la figura 3.6.

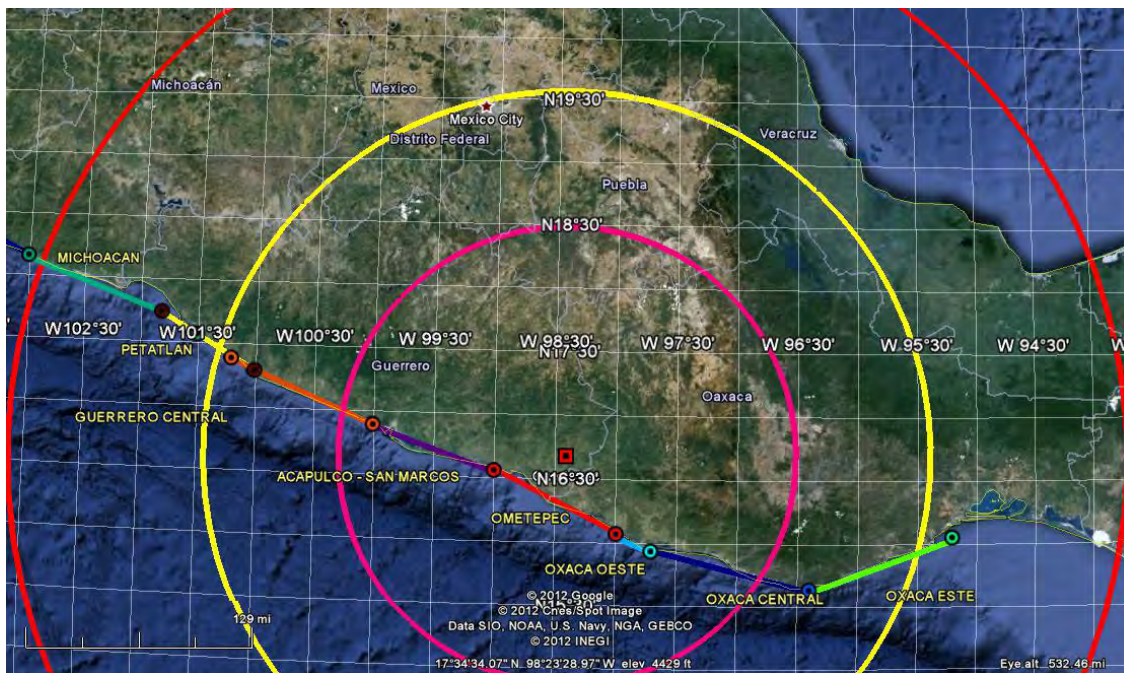


Figura 3.6 Segmentos de falla que generan peligro sísmico en Ometepec.

CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN DE LAS FUENTES SISMOGÉNICAS PARA LA CIUDAD DE OMETEPEC, GUERRERO

Las regiones de influencia fueron definidas con base en los eventos que han contribuido al potencial sísmico de Ometepec. Se observa que el círculo de 200 km (línea rosa) cubre los eventos estudiados por los diferentes investigadores para la región. Los tres círculos de influencia se definen para observar y estudiar las variantes de las diferentes fallas que se encuentran en estos radios, de manera que se pueda discutir la influencia de los segmentos de falla sobre los Espectros de Peligro Uniforme. Los segmentos de fallas considerados para cada círculo de influencia son:

1. Radio de influencia de 200 km (línea rosa) tomando como centro Ometepec: Se incluyen los segmentos de Oaxaca Central, Oaxaca Este, Ometepec y Acapulco - San Marcos.
2. Radio de influencia de 320 km (línea amarilla) tomando como centro Ometepec: Se incluyen los segmentos de Oaxaca Oeste, Oaxaca Central, Oaxaca Este, Ometepec, Acapulco - San Marcos y Guerrero Central.
3. Radio de influencia de 500 km (línea roja) tomando como centro Ometepec: Se incluyen los segmentos de Oaxaca Oeste, Oaxaca Central, Oaxaca Este, Ometepec, Acapulco - San Marcos, Guerrero Central, Petatlán y Michoacán. Al incluir el segmento de Michoacán se busca observar la influencia que este segmento sísmico tiene sobre la región de estudio.

Cabe mencionar que los radios de 320 km y 500 km incluyen 2 zonas de alta sismicidad en México. En el proceso de desagregación se observó la influencia que cada región sísmica tiene en los EPU.

3.4.2. Fuentes tipo Área para la región de Ometepec, Guerrero

Varios investigadores han estudiado las fuentes sísmicas para el estado de Guerrero, debido al potencial sísmico que presenta (González-Ruiz y McNally, 1988; Núñez-Cornú, 1996; Gómez Bernal *et al.*, 2009; Gama, 2010). La regionalización sismotectónica publicada por Zúñiga *et al.* (1997), presenta zonas características para la región de la costa y la República Mexicana en general. En Zúñiga *et al.* (1997), se ha dividido a México en

3.4. CARACTERIZACIÓN DE LAS FUENTES SISMOGÉNICAS

19 regiones principales generadoras de sismos. Las 19 regiones sismo-tectónicas son las siguientes: SUB1, SUB2, SUB3, SUB4, IN1, IN2, IN3, MVB, NAM, BC1, BC2, SMO, BAR, BB, RIV1, RIV2, RIV3, GMX, NAL. Estas fuentes están dictadas por la tectónica del país y por la historia instrumental de sismos registrados. Cada una de estas fuentes genera temblores a una tasa constante por unidad de área.

Particularmente, la región de Ometepec, que corresponde al estado de Guerrero, está incluida en las zonas SUB2, IN2 y NAM, y también está influenciada en menor proporción por las áreas SUB3 e IN1 (Zúñiga *et al.*, 1997). Para este estudio se evaluó el efecto que estas fuentes tipo área tienen sobre los EPU para la región. Estas áreas se diferencian por los mecanismos de falla que las caracterizan, en las figuras 3.7 y 3.8 se muestra la ubicación de la región Ometepec (estrella roja) y las zonas sismo-tectónicas por las que se encuentra influenciada.

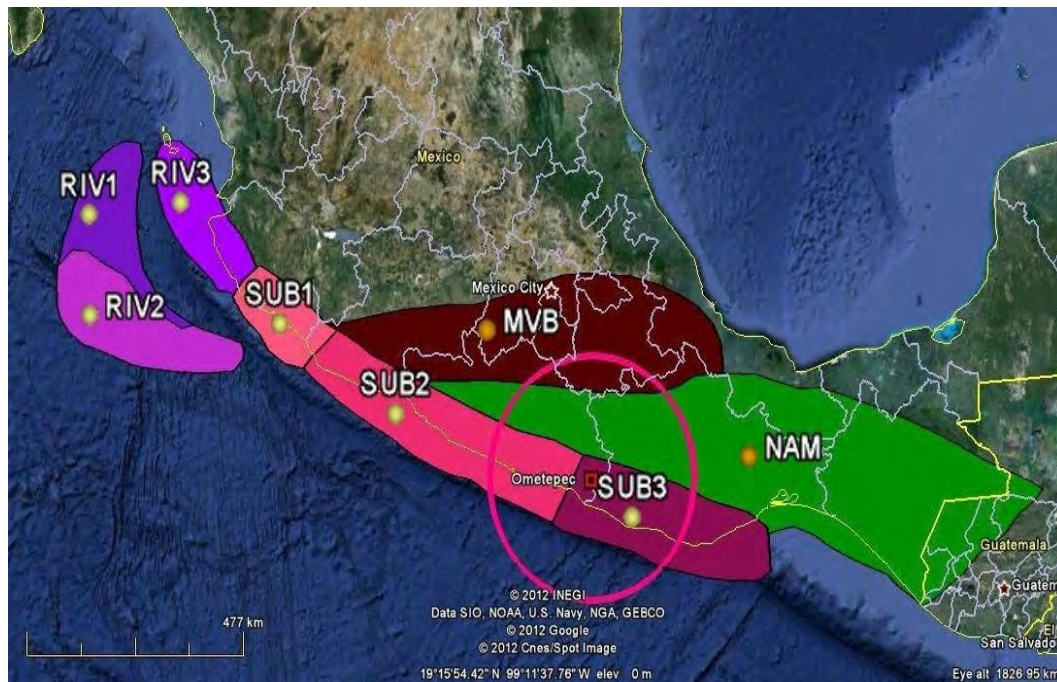


Figura 3.7 Fuentes tipo área que se estudiaron para el peligro sísmico de Ometepec.

Las zonas sismo-tectónicas estudiadas, se describen según Zúñiga *et al.* (1997):

- **Región SUB2:** Corresponde a la zona de mayor acoplamiento entre Cocos y NOAM (Placa Norte-Americana) y comprende las áreas costeras de los estados de Michoacán y Guerrero. Esta zona presenta la más alta periodicidad de temblores de magnitud M

CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN DE LAS FUENTES SISMOGÉNICAS PARA LA CIUDAD DE OMETEPEC, GUERRERO

> 7.0. La zona muestra un mayor deslizamiento acumulado con respecto al tiempo, comparado con los segmentos de subducción vecinos, por su alta frecuencia de ocurrencia.

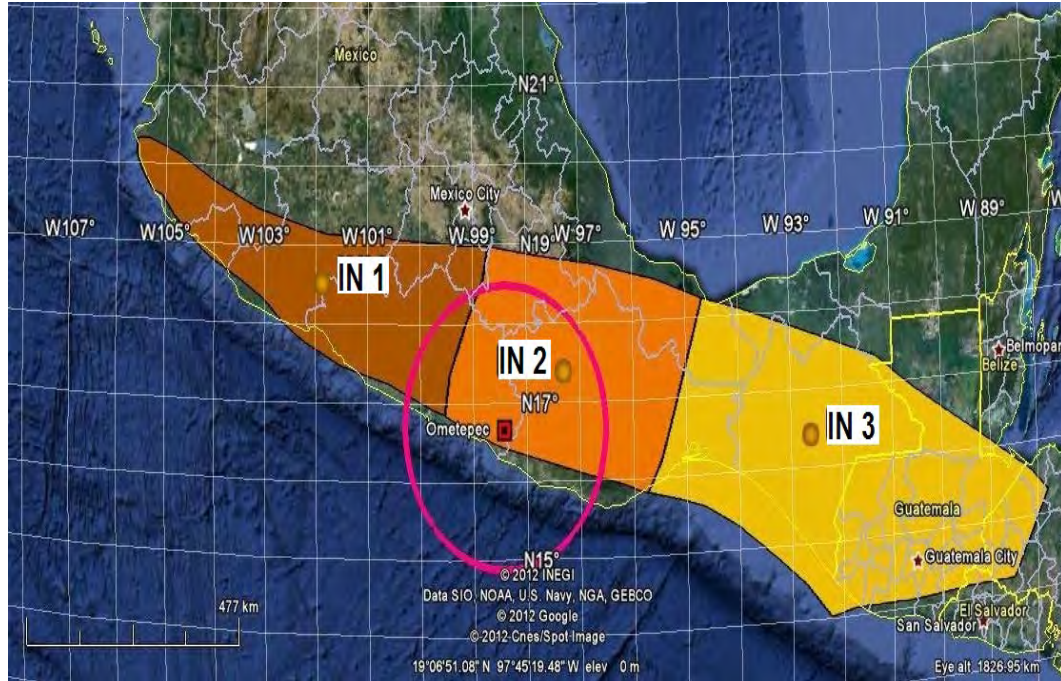


Figura 3.8 Zonas sismo-tectónicas intraplaca.

- **Región SUB3:** Es una zona transicional entre las dos tendencias principales de subducción de la placa de Cocos en el territorio de México. El lindero occidental está definido por los cambios bruscos en sismicidad, las características generales de las fuentes sísmicas y en la diferencia en rasgos tectónicos que se presentan alrededor de los 99°W de longitud. Su frontera oriental se definió con base en otro cambio en sismicidad así como por ser el sitio en donde la cordillera submarina de Tehuantepec intersecta a la trinchera.
- **Región IN1:** Subdividida en tres segmentos iguales INA (cercano a la costa del Pacífico), INB e INC (cercano al golfo de México). Esta zona comprende la sección profunda de la zona de subducción y corresponde a la extensión de las zonas SUB1 y SUB2. Los eventos que ocurren en esta zona muestran fundamentalmente mecanismos focales de falla normal. La magnitud de dichos eventos decrece con la distancia a partir

3.4. CARACTERIZACIÓN DE LAS FUENTES SISMOGÉNICAS

de la trinchera. Los sismos se localizan dentro de las placas de Rivera y Cocos en el rango de profundidad entre los 40 y los 200 km. La mayoría de los eventos tienden a ocurrir alrededor de los 120 km de profundidad. La sismicidad en la zona IN1 es considerablemente menor que la de la zona IN2.

- *Región IN2*: Subdividida en tres segmentos iguales IN2A (cercano a la costa del Pacífico), IN2B e IN2C (cercano al golfo de México). La transición entre las zonas IN1 e IN3 ha sido denominada zona IN2. Los eventos ocurridos con profundidad de foco entre 60 y 100 km ocurren a mayor distancia de la trinchera que en las zonas vecinas.

La zona corresponde a la extensión de la región SUB3, y junto a las zonas NAM, SUB2 e IN2, incluyen los mecanismos de falla descritos por González-Ruiz y McNally (1988), que dividen los eventos importantes en dos fronteras, unos cerca de la costa (con mecanismos de falla inversos) y los eventos alejados a mas de 100 km de la costa (con mecanismos de falla normal).

- *Región NAM*: Esta región comprende la actividad somera (profundidad menor a 40 km) que tiene lugar en la placa continental al sur de la Faja Volcánica Mexicana. A pesar de que el nivel de actividad para magnitudes $m_b \geq 4.5$ se encuentra uniformemente distribuido a través de gran parte de la zona, existe una mayor tasa de sismicidad en la zona del Istmo de Tehuantepec. La mayoría de los eventos son de fallamiento normal.

Los parámetros para estas fuentes sísmicas se indican en la tabla 3.4, donde se presenta la recurrencia en número de eventos por año (No./año) que exceden la magnitud mínima para la zona, el parámetro λ_0 es un parámetro estadístico definido por Zúñiga *et al.* (1997) que permite calcular la tasa de recurrencia, al igual que el parámetro β , que se define como el logaritmo de 10 veces el valor b , que corresponde a la distribución exponencial según el modelo de Richter y el Momento sísmico mayor registrado en dynas -cm.

Es interesante observar que la caracterización y revisión de la actividad sísmica hecha por Zúñiga *et al.* (1997), reafirma la definición de las fuentes ismogénicas realizadas por Núñez-Cornú (1996); donde se define que la región de Ometepec se encuentra en lo que

CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN DE LAS FUENTES SISMOGÉNICAS PARA LA CIUDAD DE OMETEPEC, GUERRERO

denominó *Zona 8*, la cual incluye las regiones de Ometepec, Pinotepa Nacional y Jamiltepec a lo largo de la costa de Oaxaca.

Los límites de la zona se indican en la figura 3.9, definidos al Oeste por el Río Copala, al Este el Río Verde, al Sur la costa americana y al Norte la Sierra Madre. Se estima que el área de ruptura del sismo de 1787, el más violento correspondiente al segmento Ometepec, fue de 130 km x 80 km aproximadamente, en esta zona se tienen intervalos de recurrencia que en promedio son de 14 años (González-Ruiz y McNally, 1988; Núñez-Cornú, 1996; Sordo *et al.*, 1995; Juárez *et al.*, 2012) con magnitudes características $M > 7$ (González-Ruiz y McNally, 1988; Núñez-Cornú, 1996).

Sigla		Tipo de evento	Placas	No. /año	M min	M max	λ_0	β	Mo dynas- cm
SUB2	SUB2	Zona de eventos interplaca someros del tipo de subducción	Converge Cocos y NOAM	1.148	5	7.2	3.484	2.21	4.5
SUB3	SUB3	Zona de eventos interplaca someros del tipo de subducción	Convergencia Cocos - NOAM, zona de transición.	1.152	5	7.2	4.133	2.55	4.5
IN1	IN1-A	Zona de eventos intraplaca (Cocos) de profundidad intermedia ($40 \text{ km} \leq h \leq 120 \text{ km}$).	Relacionados a la interfase Cocos-NOAM	1.379	5	7.9	6.92	2.41	4.5
	IN1-B			0.5599	5	7.9	6.92	2.41	4.5
	IN1-C			0.1659	5	7.9	6.92	2.41	4.5
IN2	IN2-A	Zona de eventos intraplaca (Cocos) de profundidad intermedia.	Relacionados a la zona de transición.	0.3694	5	7.9	3.175	2.02	4.5
	IN2-B			0.404	5	7.9	3.175	2.02	4.5
	IN2-C			0.3809	5	7.9	3.175	2.02	4.5
NAM	NAM	Zona de eventos intraplaca (NOAM) someros.	Placa Norteamericana	0.3615	5	7.4	1,756	3.16	4.5

Tabla 3.4 Parámetros de las fuentes sísmicas tipo área.

La definición de la Zona 8 hecha por Núñez-Cornú (1996), se basó en el historial sísmico de la región, en la figura 3.9 se muestra la ubicación de los epicentros de siete sismos importantes sucedidos en: 1928, 1937, 1959, 1968, 1982 (evento doble) y 1995. Al revisar los epicentros de estos sismos, junto con otros de fallamiento Normal mencionados en el informe

3.4. CARACTERIZACIÓN DE LAS FUENTES SISMOGÉNICAS

de González-Ruiz y McNally (1988), y considerando el evento más reciente que responde al periodo de retorno de la zona, el sismo del 20 de Marzo del 2012, en la figura 3.10 se puede observar que el área de ruptura mencionado, 130 km x 80 km, abarca los eventos más representativos de la zona. De esta manera, es posible inferir:

- La regionalización sísmica realizada por Zúñiga *et al.* (1997) concuerda con el área definida por Núñez-Cornú (1996), y es posible trabajar con las fuentes sísmicas correspondientes a las regiones SUB2, SUB3, IN1, IN2 y NAM, para el estudio de peligro sísmico.

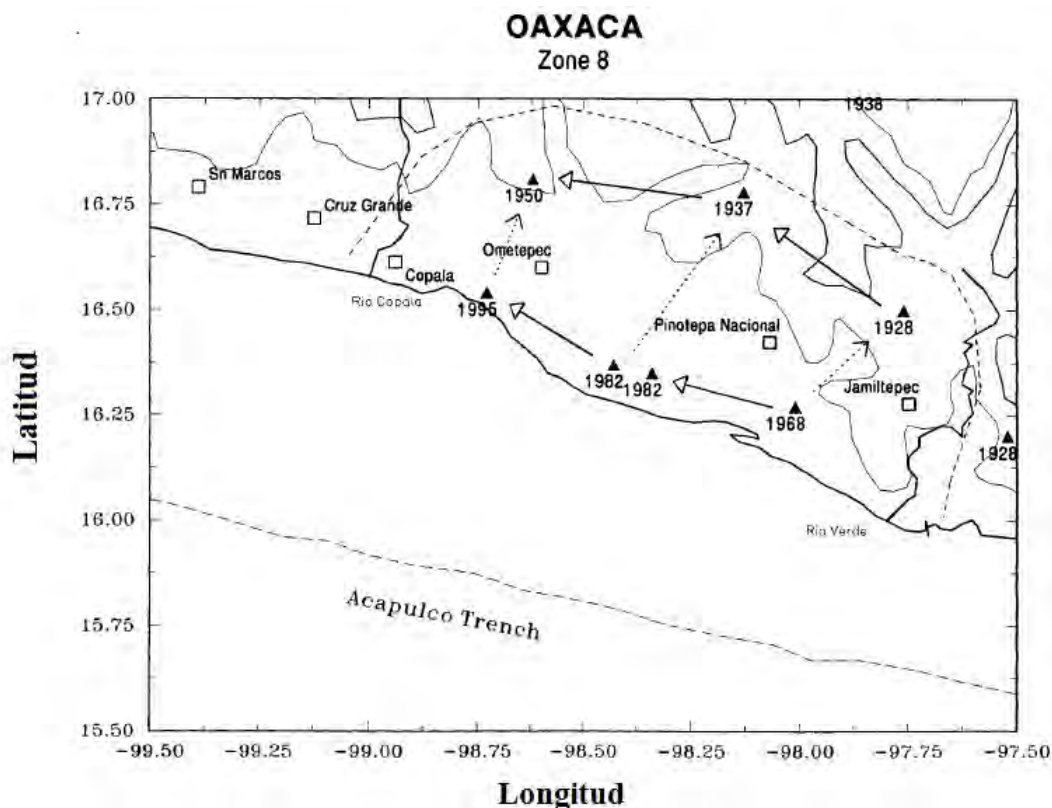


Figura 3.9 Zona 8, epicentros de sismos en el periodo 1928-1995 (Núñez-Cornú, 1996).

- La tectónica de la región Ometepepec se puede definir por tres tipos de sismicidad:
 - ◆ Zona de Subducción: Zona de eventos interplaca someros del tipo de subducción. Convergencia Cocos - NOAM (Interface).
 - ◆ Zona de eventos intraplaca (Cocos) de profundidad intermedia ($40 \text{ km} < h < 120 \text{ km}$). Relacionados a la interface Cocos-NOAM (Intraslab).

CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN DE LAS FUENTES SISMOGÉNICAS PARA LA CIUDAD DE OMETEPEC, GUERRERO

♦ Zona de eventos intraplaca (NOAM) someros.

- Aunque no puede hablarse de un tipo de recurrencia formal, ya que no todos los epicentros de los sismos característicos se han repetido, se tiene un intervalo de recurrencia de movimientos con magnitudes mayores a 7 de aproximadamente 14 ± 3.2 años (Núñez-Cornú, 1996; Sordo *et al.*, 1995; Juárez *et al.*, 2012). Al dividir la zona en tres sectores, agrupados por pares de eventos: 1928-1968, 1937-1982 y 1950-1995, se espera un periodo de retorno de 43.3 ± 2.8 años para cada sector. Esta caracterización será importante cuando se estudie la desagregación de los resultados del análisis de peligro sísmico.

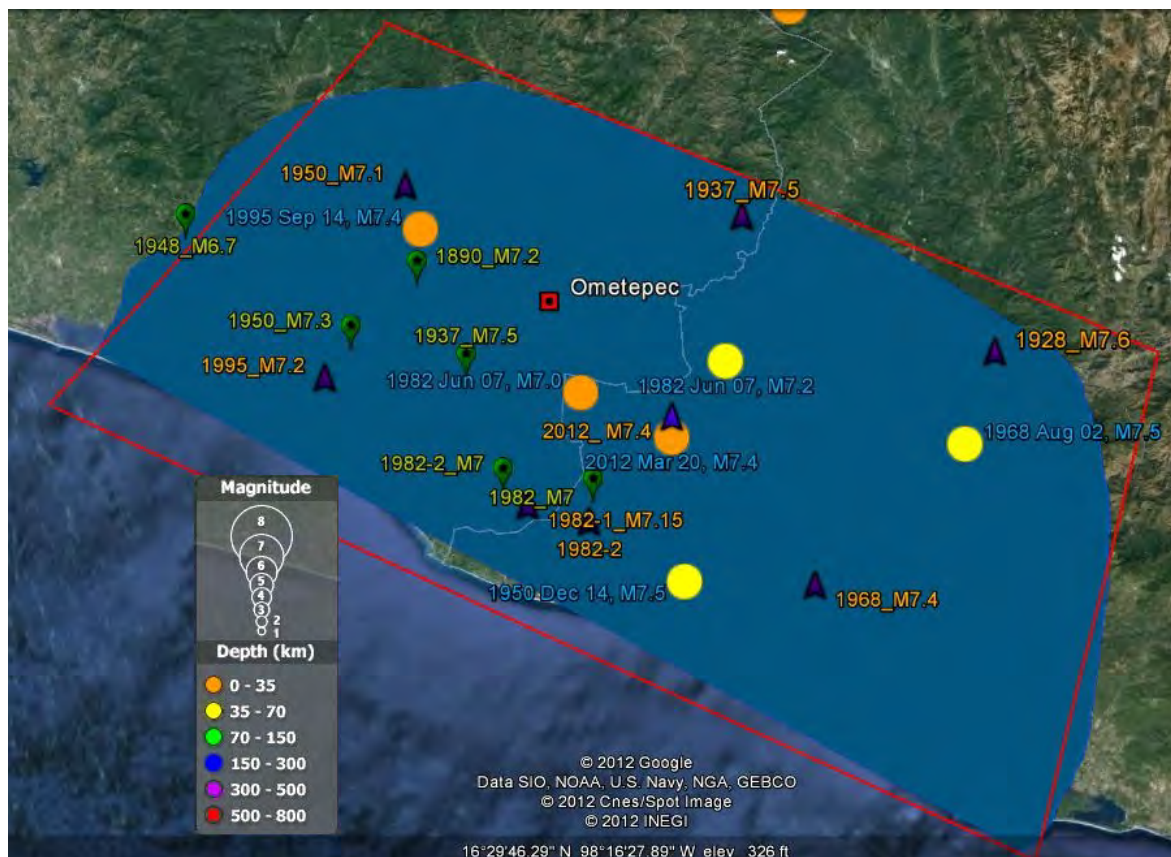


Figura 3.10 Epicentros de sismos importantes para la Región Ometepec $M > 6.5$. Los ▲ corresponden a la caracterización de Núñez-Cornú (1996); Los 📍 corresponden a la caracterización de González-Ruiz y McNally (1988); Los ● corresponden a los epicentros reportados por la USGS.



4 Descripción de condiciones geológicas y geotécnicas

El que construye una casa sobre arena merece que lo tengan por tonto.

ALEXANDER POPE, Ensayo sobre el hombre.

Los trabajos de investigación para caracterizar el tipo y uso del suelo en una región, los métodos y tipos de construcción utilizados, los peligros naturales y condiciones de aguas subterráneas (acuíferos) y a nivel de terreno, entre otros, son factores importantes para un estudio de peligro sísmico.

El suelo es un material altamente no lineal incluso a bajas deformaciones, a medida que las deformaciones crecen, la rigidez del suelo disminuye mientras que el amortiguamiento se incrementa. La resistencia a corte de los suelos bajo carga sísmica, está influenciada por la presión de poros que se pueda generar y los efectos de la degradación cíclica, en este efecto son importantes los fenómenos de densificación y licuación (Kramer y Stewart, 2004).

Debido al comportamiento no lineal del suelo en términos de los parámetros esfuerzo - deformación y su relación ante la respuesta a excitaciones sísmicas, es importante conocer sus propiedades dinámicas y determinar, bajo ciertas consideraciones, si el comportamiento del suelo estudiado puede mantenerse en su rango lineal, permitiendo utilizar propiedades dinámicas lineales representativas del mismo para un análisis sísmico. La determinación de las propiedades dinámicas del terreno requiere de un estudio geotécnico confiable. La investigación del subsuelo debe efectuarse mediante exploraciones de campo y ensayos de laboratorio.

CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN DE CONDICIONES GEOLÓGICAS Y GEOTÉCNICAS

Las pruebas más comunes realizadas en la práctica de la ingeniería sísmica geotécnica están divididas en dos grupos, aquellas pruebas que miden propiedades a bajas deformaciones: las pruebas de campo inducen ondas sísmicas en el suelo y buscan medir las velocidades a las que dichas ondas se propagan, de manera que se calcula el módulo de cortante a bajas deformaciones; y las que miden propiedades a deformaciones intermedias a grandes: las pruebas de campo en este caso son más complicadas, y las pruebas de laboratorio en general resultan de incluir cargas dinámicas a pruebas convencionales (pruebas cíclicas triaxiales, entre otras), entonces se pueden clasificar como:

1. Pruebas de campo: Método de Crosshole, pruebas Down-hole y Up-hole, Cono Sísmico, Reflexión y Refracción Sísmica, SASW entre otras (Kramer, 1996). Las pruebas de campo a grandes deformaciones incluyen: la prueba de penetración estándar (SPT), penetración de cono (CPT), prueba de dilatómetro (DMT) y del presiómetro (PMT) (Gama, 2010).
2. Pruebas de laboratorio: Columna Resonante, Pulsos Ultrasónicos, pruebas Cíclicas (las pruebas cíclicas triaxial o corte simple, son apropiadas sólo para magnitudes de deformación medias y grandes $10^{-4} < \gamma_c < 10^{-1}$ y son utilizadas para determinar ciclos histeréticos esfuerzo-deformación (Fernandez, 2012).

Si bien el municipio de Ometepe ha sido escenario de eventos sísmicos importantes en la historia de México, pocos estudios detallados que determinen la respuesta sísmica del subsuelo del sitio se han realizado, sobre todo para estratos superficiales, con el objetivo de identificar amplificación de ondas y características propias de la región. En este capítulo se presenta una reseña del material recopilado a nivel cualitativo de la región. Se ha observado en sismos pasados, que la región no ha presentado grandes amplificaciones de movimientos sísmicos, ya que los daños ocasionados a la infraestructura de la zona son producto principalmente del tipo de construcciones y los deslizamientos de tierra que se han producido, principalmente por fallas de taludes artificiales en las carreteras.

4.1. DESCRIPCIÓN LOCAL

4.1. Descripción local

El municipio de Ometepec, ubicado entre los $16^{\circ}30' 44''$ y $16^{\circ}48' 08''$ de latitud Norte y los $98^{\circ}12' 00''$ y $9^{\circ}30' 12''$ de longitud Oeste, se encuentra en la región de Costa Chica del estado de Guerrero. La geomorfología del estado es de las más complejas del país, en su relieve destaca la Sierra Madre del Sur y las Sierras del Norte; entre ambas formaciones se ubica la Depresión del río Balsas. La región de Ometepec, se ubica dentro la Vertiente Meridional (región de Lomerías de la vertiente pacífica), limitada al Sur por la Sierra Madre del Sur y al Este por la altiplanicie Oaxaqueña. La figura 4.1 muestra una vista general del Estado de Guerrero y la ubicación del Municipio de Ometepec al Sur-Este del mismo, en cuya imagen se muestra la distribución de las regiones geológicas más importantes.

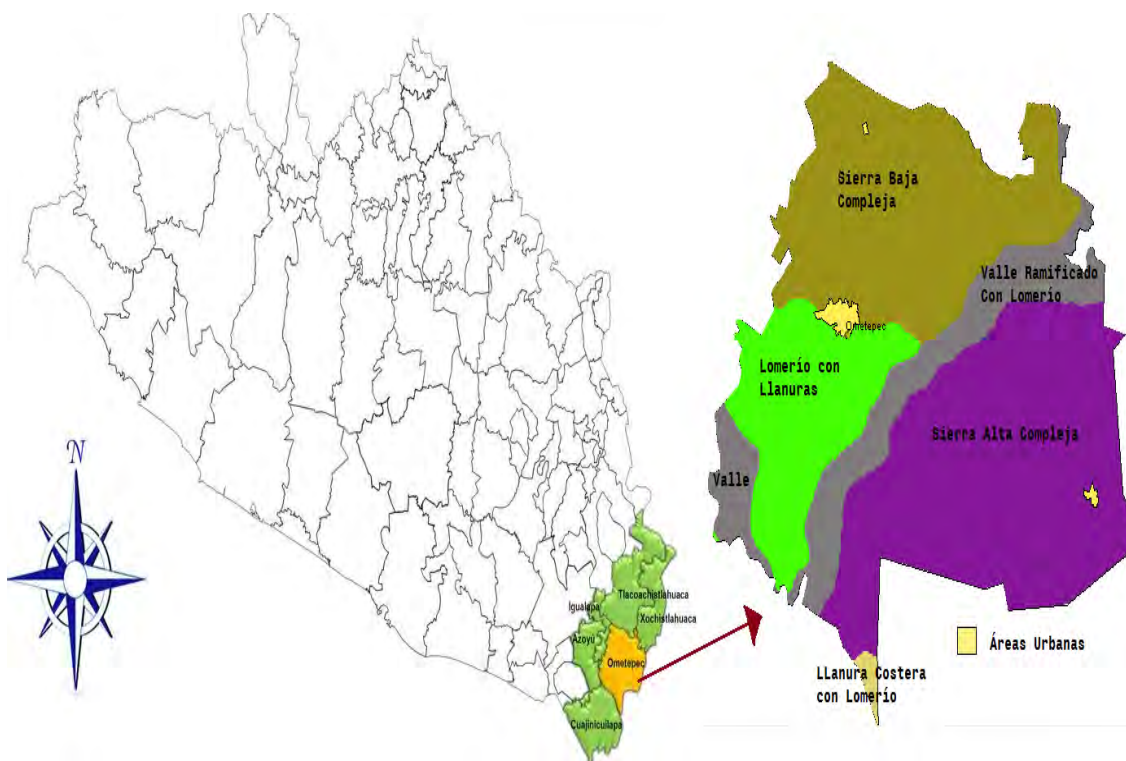


Figura 4.1 Izq.: Estado de Guerrero y ubicación del Municipio de Ometepec; Der.: Regiones topomorfas del Municipio de Ometepec (modificado del Portal Interactivo, Estadístico y Geográfico de Guerrero; <http://www.campoguerrero.gob.mx/siggro/alov/mpios/ometepe/index.html>).

Las principales características del relieve en la región se describen mediante las principales estructuras geológicas formadas al paso del tiempo, la condiciones de degradación

CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN DE CONDICIONES GEOLÓGICAS Y GEOTÉCNICAS

de los suelos y la presencia de diferentes porcentajes en el terreno de sierra, valles, llanura y lomerío (en menor porcentaje que los anteriores). Con elevaciones de cerros que van desde 800 msnm al norte del municipio y al Sur con elevaciones hasta 1000 msnm.

El sector Norte de Ometepec, esta formado por Sierra y Lomerío, se encuentran principalmente rocas metamórficas (gneis, roca metamórfica compuesta por los mismos minerales que el granito con orientación definida en bandas, con capas alternas de minerales claros y oscuros.) pertenecientes al Mesozoico, este sector alcanza niveles de 400 a 700 msnm. El sector Sur-Oeste del municipio cuyo relieve predominante es el Lomerío, se encuentra formado por depósitos del Cuaternario con alturas menores 200 msnm por su cercanía a la costa. El valle central y gran parte de la sierra en la parte Sur Este, están formadas por rocas suaves a semi-duras de tipo ignea intrusiva (depósitos del Terciario) con elevaciones de Oeste a Este de 300 msnm a 1000 msnm respectivamente, siendo este sector el que mayores elevaciones presenta.

Finalmente la sierra Sur-Este está formada por rocas metamórficas del Mesozoico (depósitos del Jurásico) alcanzándose niveles de elevación menores a 500 msnm. La distribución mencionada se puede apreciar en la figura 4.2, en la que se incluyen los cuerpos de agua existentes y las brechas (fallas) presentes en la región, es posible observar que el curso de agua que atraviesa a todo el municipio es el Río Santa Catarina que llega a desembocar en el Mar del Pacífico.

Astiz y Kanamori (1984) estudiaron el sismo doble del 7 de Junio de 1982 que ocurrió cerca a Ometepec, y como este evento han ocurrido varios eventos dobles a lo largo de la costa del pacífico (Middle America Trench); observaron que los eventos de liberación y acumulación de energía en la región, son producto de la distribución de asperezas en la costa resultantes de los procesos de subducción de capas tectónicas. La distribución homogénea de las asperezas se debe a la alta velocidad de convergencia que produce una rápida acumulación de deformación y cortos intervalos de recurrencia para sismos grandes.

4.1. DESCRIPCIÓN LOCAL

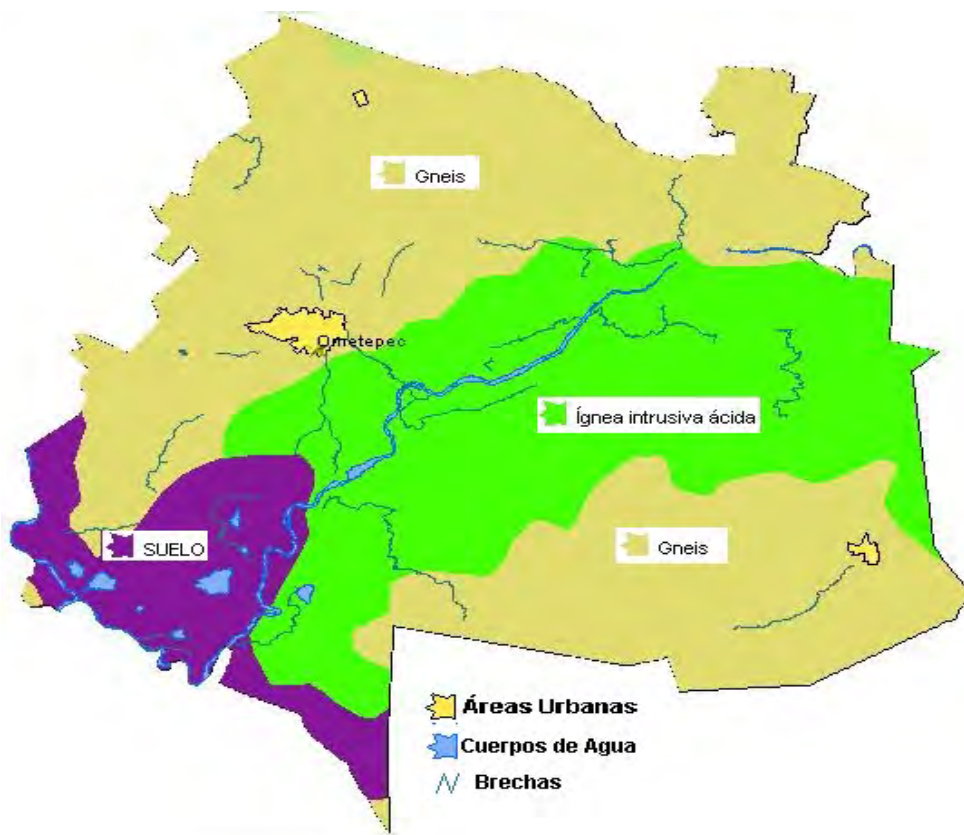


Figura 4.2 Distribución de tipos de roca, brechas y cuerpos de agua en el municipio de Ometepec (modificado del Portal Interactivo, Estadístico y Geográfico de Guerrero; <http://www.campoguerrero.gob.mx/siggro/alov/mpios/ometepe/index.html>).

Sordo *et al.* (1995) describen de manera particular la composición geológica del suelo de la ciudad de Ometepec:

La geología de la roca basal en esta área está compuesta de rocas graníticas intrusivas del Jurásico muy esparcidas en la región, con intrusión local de plutones graníticos del Terciario. Los granitos más viejos están muy intemperizados, mientras que los más recientes se encuentran moderadamente afectados. La capa de roca más antigua está compuesta por granitos fuertemente descompuestos, con un contenido considerable de arcillas, cubiertos por depósitos de laterita de gran espesor donde la topografía es suave, la cual se usa localmente para fabricar adobes de diversa calidad para la construcción de casas. (Sordo et al., 1995, p. 3)

4.2. Características topográficas del terreno

La topografía es un parámetro relacionado tanto con la geología como con la geotecnia. Mediante esta ciencia es posible identificar la geología de la capa superficial, comprendiendo las características del relieve de la región descritas anteriormente y entender los posibles efectos topográficos de la región. En la figura 4.3 se incluye una vista en elevación del terreno, observándose la diferencia con la ciudad de Chilpancingo que se encuentra a mayor altitud y rodeada de cadenas montañosas, la ciudad de Ometepec por otro lado, presenta una elevación promedio de 300 msnm y se encuentra en la parte del Valle del Municipio, aledaña al curso del Río Santa Catarina.

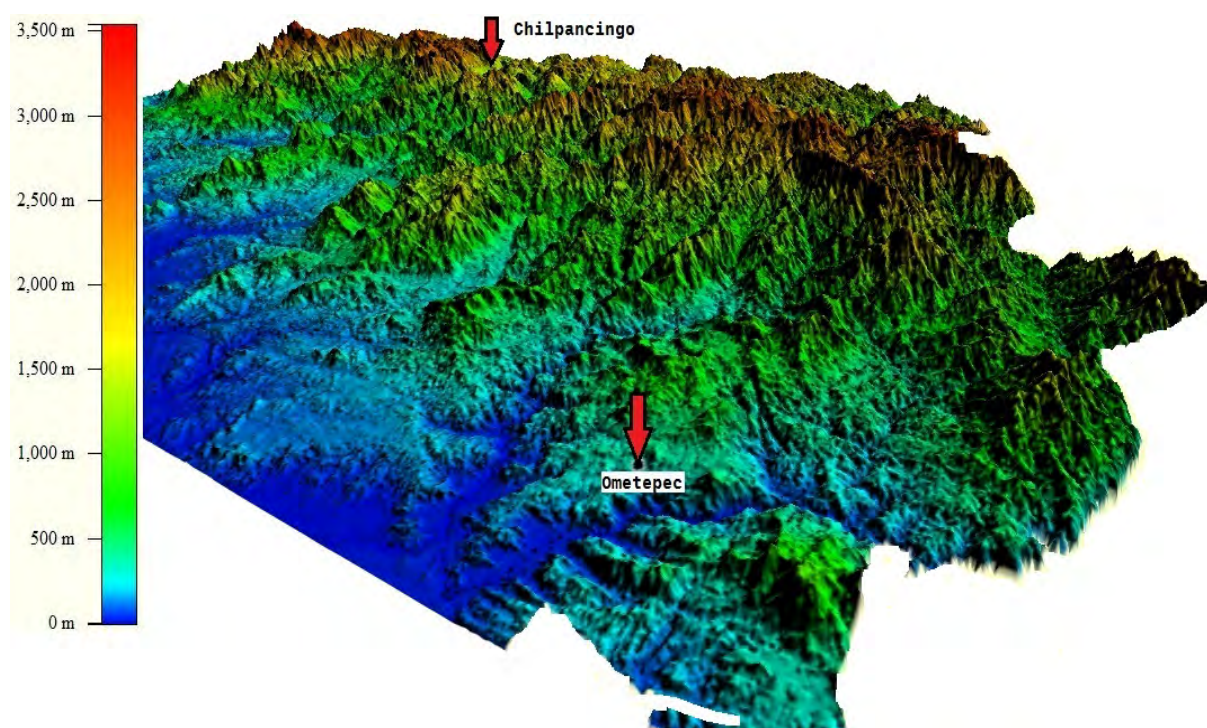


Figura 4.3 Modelo de Elevación del Terreno realizado para el sector Sur-Este del estado de Guerrero (Fuente: INEGI).

En la figura 4.4 se muestra un mapa topográfico de la región, se identifica la ciudad de Ometepec en la parte mas baja del valle. El municipio de Ometepec presenta una estructura muy característica, con elevaciones montañosas en los alrededores, más notorias hacia el Norte. La parte central, que atraviesa el Río Santa Catarina, es la parte mas baja con elevaciones desde 300 msnm hasta 800 msnm en la parte de las montañas al norte de la

4.2. CARACTERÍSTICAS TOPOGRÁFICAS DEL TERRENO

ciudad. Se observa entonces, que la topografía de la ciudad de Ometepec es suave, esta información es importante para estimar efectos de sitio por efectos topográficos y efectos de direccionalidad de las ondas sísmicas para el análisis de peligro sísmico.

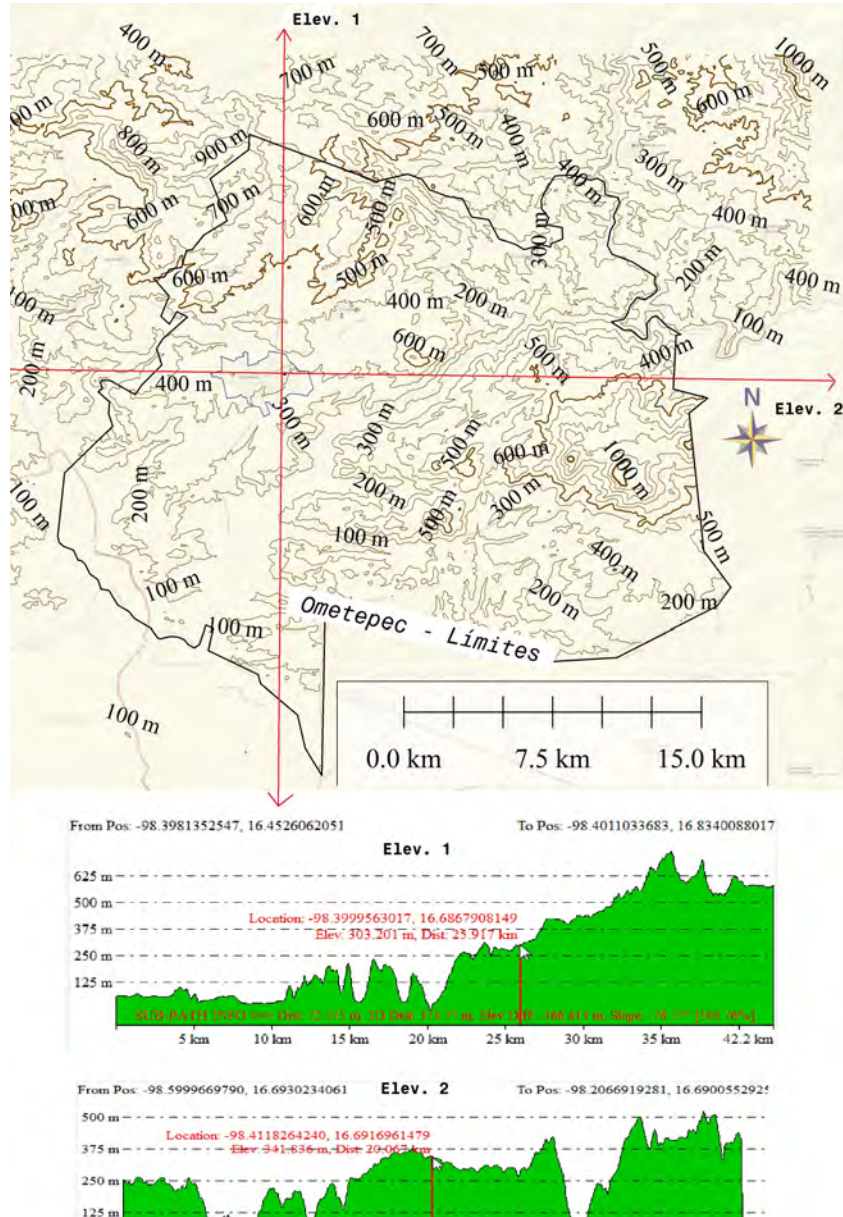


Figura 4.4 Curvas de nivel y dos cortes transversales que indican la posición de la ciudad de Ometepec en la parte más baja del valle.



5 Relaciones de atenuación del Movimiento Fuerte del suelo

Descubrí que la naturaleza estaba construida de una forma maravillosa y que nuestra tarea consiste en descubrir la estructura matemática de la propia naturaleza, es una especie de fe que me ha ayudado durante toda mi vida.

Walter Isaacson, Einstein: Su vida y su universo.

5.1. Antecedentes

La evaluación del peligro sísmico, desde el punto de vista de la ingeniería civil, ha evolucionado a contratiempo, debiendo dar respuestas rápidas a una sociedad que reclama más seguridad para las edificaciones. Los escasos registros acelerográficos locales, obligaron a usar datos registrados en varias partes del mundo para realizar una regresión que mostrara las aceleraciones pico (o cualquier otro parámetro sísmico) esperadas para un sismo de una magnitud dada en función de la distancia. Fue así como se desarrollaron las conocidas *relaciones de atenuación* que han sido estudiadas desde hace aproximadamente 50 años (Gutenberg y Richter, 1956; Esteva, 1970; Trifunac y Brady, 1976; Seed *et al.*, 1976; Boore *et al.*, 1980).

En las relaciones de atenuación se han incluido variables como la profundidad del hipocentro, tipo de suelo, magnitud de sismo (M), distancia del sitio en consideración a la fuente (R), y variables propias de los procesos de regresión como la desviación estándar (σ) de la base de datos utilizada, la descripción de estos parámetros se muestra en el título 2.2.3. Al utilizar una relación de atenuación es importante conocer cómo se han definido los

5.2. DEFINICIÓN DE MODELOS DE ATENUACIÓN

parámetros M y R, ya que se deben utilizar de una manera consistente. Se debe reconocer también, que diferentes relaciones de atenuación se obtienen con diferentes bases de datos, por lo que para utilizar alguna relación de atenuación, se debe tener consistencia de los datos y variables utilizados para obtenerla y las características sísmicas de la zona en estudio.

En este capítulo se presentan las relaciones de atenuación que se utilizaron para el estudio de Peligro Sísmico de Ometepec, se describen los parámetros generales de cada modelo al igual que las ecuaciones generales que definen las aceleraciones en función de los periodos en estudio. Los dos modelos de atenuación mundiales utilizados, se han basado en movimientos registrados en Guerrero, entre otros eventos a nivel mundial generados por procesos de subducción, fallas interplaca e intraplaca. De manera similar, tres modelos de atenuación mexicanos fueron seleccionados, los cuales describen eventos de subducción e interplaca utilizando registros de las costas de Guerrero y Oaxaca.

5.2. Definición de modelos de atenuación

Se utilizaron 5 relaciones de atenuación, con modelos definidos en términos de la aceleración espectral del terreno, dos de ellos desarrollados a nivel global (Youngs *et al.*, 1997; Atkinson y Boore, 2003), y dos de ellos desarrollados para México (García *et al.*, 2005; Arroyo *et al.*, 2010); por último se utilizó una relación de atenuación para el parámetro de aceleración pico del terreno (PGA) desarrollada para México (Gómez-Bernal *et al.*, 2012). Se estudiaron los efectos de cada una sobre el peligro sísmico de la región. A continuación se describen las principales expresiones y parámetros que definen las relaciones de atenuación mencionadas:

- **Youngs *et al.*(1997), Y97:** Desarrollada por R.R. Youngs, S.J. Chiou, W.J. Silva y J.R. Humphrey. En este modelo de atenuación se han considerado dos tipos de sismos en zonas de subducción, sismos interplaca y sismos intraplaca. Los sismos interplaca suelen estar producidos por fallas inversas de poco ángulo que ocurren en la interfase entre la placa subducente (oceánica) y la placa que se desliza por debajo de la anterior (continental). Ejemplo de tales sismos son: Alaska 1964 (M = 9.2), Valparaíso 1985 (M = 8.0) y Michoacán 1985 (M = 8.0).

CAPÍTULO 5. RELACIONES DE ATENUACIÓN DEL MOVIMIENTO FUERTE DEL SUELO

Los sismos denominados intraplaca, ocurren en el interior de la placa que subduce por encima de la lámina neutra y típicamente son de falla normal, con gran ángulo de inclinación debido a las tensiones internas en esta placa. Como ejemplo se tienen los sismos de Puget Sound 1949 y 1965 ($M_b = 7.1$ y $M_s = 6.5$, respectivamente). La diferencia fundamental en la selección de ambos tipos de sismos, está en el mecanismo y en la profundidad del foco. Los autores consideran que profundidades mayores que 50 km corresponden a sismos intraplaca.

Las relaciones de atenuación se desarrollaron para la aceleración pico del suelo y respuesta espectral, considerando magnitudes de momento iguales o mayores a 5 y para distancias de 10 a 500 km. Las relaciones se desarrollaron con base en un análisis de regresión aleatoria (Youngs *et al.*, 1997), equivalente al análisis de regresión en dos etapas (Joyner y Boore, 1993), utilizándose además como ayuda para la validación del modelo, un método de simulación numérica de sismos interplaca, de gran magnitud. La relación de atenuación permite el cálculo de la aceleración pico del terreno (PGA), considerando valores específicos de los coeficientes de regresión c_1 a c_5 presentados en Youngs *et al.* (1997).

Se utilizó una base de datos que incluye registros de movimientos fuertes del suelo de zonas de subducción interplaca e intraplaca de Alaska, Chile, EEUU (Cascadia), Japón, México, Perú y las Islas Solomón. Los eventos de México utilizados para la regresión, incluyen 23 registros distribuidos por la costa entre coordenadas (Lat, Long) 16°N , 98°W y 18.3°N , 101°W ; 12 registros de Oaxaca, 47 de Guerrero, 17 de Playa Azul y 45 de Michoacán. La ecuación que define el movimiento para roca:

$$\begin{aligned} \ln SA(T) = & 0.2418 + 1.414 M + c_1(T) + c_2(T) (10 - M)^3 \\ & + c_3(T) \ln(r_{rup} + 1.7818 e^{0.554 M}) + 0.00607 H + 0.3846 Z_T \end{aligned} \quad (5.1)$$

Donde:

SA: Aceleración espectral normalizada con la constante de gravedad (g), calculada para el periodo T en estudio.

5.2. DEFINICIÓN DE MODELOS DE ATENUACIÓN

T : Periodo en estudio (s).

$c_1(T)$ a $c_5(T)$: Coeficientes dependientes del periodo T en estudio, obtenidos de la regresión de datos presentados en Youngs *et al.* (1997).

M : Momento Magnitud.

H : profundidad en kilómetros.

Z_T : tipo de fuente: 0 para interplaca y 1 para intraplaca.

R o r_{rup} : distancia más cercana a la ruptura en km, denominada distancia a la ruptura, definida como la distancia mínima a la superficie de ruptura. En los sismos pequeños esta distancia es aproximadamente, la distancia hipocentral. El intervalo de distancias considerado es de 10 a 500 km.

σ : Desviación estándar, $c_4(T) + c_5(T) M$, para magnitudes mayores a 8 $\Rightarrow M=8$.

- **Atkinson - Boore (2003), AYB03**: Desarrollada por Gail M. Atkinson y David M. Boore. Estas relaciones de atenuación fueron desarrolladas para sismos que ocurren en zonas de subducción. Se desarrollaron con una base de datos de 1200 simulaciones de espectros de componente horizontal en el intervalo de magnitudes $M > 5$, con 100 km de distancia hipocentral, a $M > 7$ con 300 km, además miles de registros para grandes distancias. Todos los espectros de respuesta consideran el componente horizontal de aceleración con 5 % de amortiguamiento, para frecuencias entre 0.33 Hz y 25 Hz. Los eventos estudiados cubren magnitudes de 5 a 8.3 ocurriendo en las zonas de subducción alrededor del mundo, incluyendo eventos intraplaca e interplaca, con registros de Japón (datos de Kyoshin-Net), México (datos de Guerrero) y Centro América (El Salvador). Se utilizaron 162 registros de estaciones acelerográficas del Estado de Guerrero medidos en suelo firme (NEHRP C, D, E). La relación de atenuación del suelo se obtuvo utilizando métodos de regresión estocásticos (probabilidades máximas) (Joyner y Boore, 1993). La ecuación que define este movimiento es:

$$\log S A(T) = f n(M) + c_3(T) h + c_4(T) R - g \log R + c_5(T) s l S_c + c_6(T) s l S_D + c_7(T) s l S_E \quad (5.2)$$

Donde:

CAPÍTULO 5. RELACIONES DE ATENUACIÓN DEL MOVIMIENTO FUERTE DEL SUELO

SA: Componente horizontal de pseudo-aceleración (cm/sec^2) del terreno para 5 % de amortiguamiento, calculada para el periodo T en estudio.

T : Periodo espectral en estudio (s).

M: Momento magnitud, para eventos interplaca con $M > 8.5$ se utiliza $M=8.5$. Para eventos intraplaca con $M \geq 8$ utilizar $M=8$.

$c_1(T)$ a $c_7(T)$: Coeficientes dependientes del periodo en estudio, obtenidos de la regresión de datos, presentados en Atkinson y Boore (2003).

$\text{fn}(\mathbf{M})$: $c_1(T)+c_2(T) M$

h: profundidad del foco en km, para eventos con profundidad mayor a 100 km, usar $h=100$ km.

R: Definido como $\sqrt{(D_{fault}^2 + \Delta^2)}$

D_{fault} : distancia más cercana a la superficie de falla en km.

Δ : Definido como el coeficiente de saturación por cercanía a la fuente, $0.00724 \times 10^{0.507 M}$

S_C : 1 para clase de suelo C según clasificación NEHRP ($360 < \beta \leq 760 \text{ m}/\text{sec}$), para otros casos es 0.

S_D : 1 para clase de suelo D según clasificación NEHRP ($180 \leq \beta \leq 360 \text{ m}/\text{sec}$), para otros casos es 0.

S_E : 1 para clase de suelo E según clasificación NEHRP ($\beta < 180 \text{ m}/\text{sec}$), para otros casos es 0.

g: $10^{(1.2-0.18 M)}$ para eventos interplaca, y $10^{(0.310-0.01 M)}$ para eventos intraplaca.

sl: * 1 para $PGA_{rx} \leq 100 \text{ cm}/\text{sec}^2$ o para frecuencias $\leq 1 \text{ Hz}$

* $1 - (f - 1)(PGA_{rx} - 100)/400$ para $100 < PGA_{rx} < 500 \text{ cm}/\text{sec}^2$ o para $1 \text{ Hz} < f < 2 \text{ Hz}$

* $1 - (f - 1)$ para $PGA_{rx} \geq 500 \text{ cm}/\text{sec}^2$ ($1 \text{ Hz} < f < 2 \text{ Hz}$)

* $1 - (PGA_{rx} - 100)/400$ para $100 < PGA_{rx} < 500 \text{ cm}/\text{sec}^2$ ($f \geq 2 \text{ Hz}$ y PGA)

* 0 para $PGA_{rx} \geq 500 \text{ cm}/\text{sec}^2$ ($f \geq 2 \text{ Hz}$ y PGA)

5.2. DEFINICIÓN DE MODELOS DE ATENUACIÓN

PGA: Se define como la aceleración pico del terreno. La relación de atenuación permite el cálculo de la aceleración pico del terreno (PGA) considerando valores específicos de los coeficientes c_1 a c_7 presentados en Atkinson y Boore (2003).

PGA_{rx} : es el PGA calculado para roca (NEHRP B), en cm/sec^2 y σ es la desviación estándar de residuos, igual a $\sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)}$ donde 1 y 2 denotan la variabilidad estimada para eventos intraplaca e interplaca. β es la velocidad de onda de corte promedio para los 30 primeros metros del perfil de suelo.

- **García y et al. (2005), GA05:** Desarrollada por D. García, S.K. Singh, M. Herraíz, M. Ordaz y J.F. Pacheco. Ecuación de atenuación para obtener la pseudo-aceleración espectral con 5 % de amortiguamiento crítico, aceleración pico y velocidad pico en roca y campo libre, para sitios con ocurrencia de sismos de profundidad intermedia, de fallamiento normal intraplaca de México Central. La base de datos comprende a 16 sismos registrados ($5.2 \leq M_w \leq 7.4$; $35 \leq H \leq 138$ km). a distancias menores de $R \leq 400$ km. El catálogo utilizado se buscó que fuera homogéneo respecto a la tectónica, mecanismo de falla y clase de suelo. La relación de atenuación permite el cálculo de la aceleración pico del terreno (PGA) y velocidad pico del terreno (PGV), considerando valores específicos de los coeficientes c_1 a c_5 presentados en García et al. (2005). La ecuación que define el movimiento para roca:

$$\log SA(T) = c_1(T) + c_2(T) M_W + c_3(T) R - c_4(T) \log(R) + c_5(T) H + \sigma \quad (5.3)$$

Donde:

SA: Aceleración espectral horizontal para 5 % de amortiguamiento, unidades en cm/s^2 , calculada para el periodo T en estudio.

T : Periodo espectral en estudio (s).

M_W : Magnitud de Momento.

H : profundidad al foco en kilómetros.

$c_1(T)$ a $c_5(T)$: coeficientes definidos según un análisis de regresión al conjunto de datos, los cuales varían para cada periodo espectral T en estudio y se presentan en García et al. (2005).

R : es la distancia aproximadamente igual al promedio de la distancia a la superficie de falla en km, definida por $R = \sqrt{R_{cld}^2 + \Delta^2}$, donde R_{cld} es la distancia más cercana a la superficie de falla para eventos grandes ($M_W > 6.5$), o la distancia hipocentral para el resto de los casos en km y Δ es un coeficiente por saturación de fuente cercana tomado como $\Delta = 0.00750 \cdot 10^{0.507 M_W}$.

σ : es la desviación estándar.

- **Arroyo y *et al.* (2010), ARR10:** Desarrollado por D. Arroyo, D. García, M. Ordaz, M. A. Mora y S. K. Singh. Derivaron una relación de atenuación para componentes horizontales de pseudo aceleración espectral para sismos interplaca Mexicanos en roca (Clase B según la clasificación NEHRP) en la región de la costa. La solución del funcional se obtuvo de una solución analítica de un modelo circular de fuente-finita.

La base de datos consistió en una colección de eventos interplaca, con tipo de falla Normal y $M_W \geq 5$ registrados entre 1985 y 2004 en la costa del Pacífico entre los estados de Colima y Oaxaca, excluyendo únicamente aquellos eventos cercanos cuya radiación de altas frecuencias es anormalmente baja, eventos pequeños con $M_W \leq 5.5$ y distancias lejanas $R > 100$ km. El estudio se concentró en un rango de Magnitudes de uso ingenieril $M_W \geq 6.5$ y $R < 150$ a 200 km.

El análisis de regresión se hizo con técnicas recientes Bayesianas multivariantes. El modelo resultante tiene bastante congruencia con modelos regionales y mundiales derivados para zonas de subducción:

$$\ln SA(T) = \alpha_1(T) + \alpha_2(T) M_W + \alpha_3(T) \ln \left[\frac{E_1(\alpha_4(T) \cdot R) - E_1(\alpha_4(T) \cdot \sqrt{R^2 + ro^2})}{ro^2} \right] \quad (5.4)$$

$$ro^2 = 1.4447 \cdot 10^{-5} \cdot e^{2.3026 M_W} \quad (5.5)$$

Donde:

$SA(T)$: Aceleración espectral horizontal para 5 % de amortiguamiento calculada para el periodo T en estudio.

5.2. DEFINICIÓN DE MODELOS DE ATENUACIÓN

$\alpha_i(T)$: Son coeficientes determinados por análisis de regresión dependientes del periodo T es estudio.

R : La distancia más cercana a la superficie de falla en kilómetros.

M_W : Momento magnitud.

E_1 : Integral exponencial, obtenida mediante métodos numéricos.

r_o : Es el radio equivalente a un falla circular con base en el modelo de Brune (Arroyo *et al.*, 2010), y esta definida por la ecuación 5.5.

- **Gómez y *et al.* (2012), GO12:** Desarrollado por A. Gómez Bernal, M.A. Lecea y H. Juárez García. Desarrollaron una relación de atenuación empírica para diferentes parámetros sísmicos: intensidad de Arias (I_A), aceleración pico del terreno (PGA) y velocidad pico del terreno (PGV), para sismos tipo interplaca, intraplaca y eventos corticales superficiales con $M_W > 6$ y distancias entre 20 y 600 km. La relación de atenuación obtenida está en función de la magnitud, distancia a la falla y mecanismo de falla, obtenida con base a 600 registros sísmicos correspondiente a 25 sismos de zonas activas de México. Se utilizó un análisis de regresión en dos pasos, en la primera etapa se aplicó la regresión a los 17 eventos sísmicos ocurridos entre 1979 y 1999, todos ellos con magnitud mayor a 6, definiendo el parámetro b , en la segunda parte de la regresión se consideró el tipo de falla, por lo que la función de atenuación propuesta varía para los diferentes tipos de fuentes sismo-génicas estudiadas.

Solo se incluyeron registros de estaciones localizadas en suelo firme o roca. Los registros de aceleración corresponden a la base de datos de la *Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes, BMDSF*. En el estudio de peligro sísmico de este trabajo se utilizó la relación de atenuación que predice la aceleración pico del terreno (o por sus siglas en inglés PGA). El modelo de regresión usado con base en la distancia a la falla esta dada por:

$$\log(A) = b - \log(R + c) - k R \quad (5.6)$$

$$c = 0.0055 * 10^{0.525 M_W} \quad (5.7)$$

$$b = a M_W + d H + e_1 S_1 + e_2 S_2 + e_3 S_3 + f + \epsilon \quad (5.8)$$

Donde:

A: es el parámetro de interés I_A , PGA o PGV.

b: es el factor de contrapeso para cada sismo.

k: es el coeficiente asignado para cada parámetro sísmico, para PGA es 0.0015.

c: coeficiente que toma en cuenta la saturación de las amplitudes debido a la proximidad de la fuente, que considera una distancia efectiva que incrementa con la magnitud.

R: la distancia más cercana a la superficie de falla en *km*.

M_W : Magnitud de Momento .

H: Profundidad focal en kilómetros.

a, d, e_1 , e_2 , e_3 , f: Son coeficientes determinados por el análisis de regresión, presentados en Gómez-Bernal *et al.* (2012).

Si: factores que toman en cuenta el tipo de falla, toma el valor de 1 para el tipo de falla en estudio y 0 para el resto.

ϵ : Desviación estándar.

5.3. Relaciones de atenuación del movimiento fuerte del suelo en el programa EZ-FRISK TM

Para estimar el Peligro Sísmico, se utilizó el programa EZ-FRISK, el programa permite seleccionar las ecuaciones de atenuación necesarias según el caso de estudio, además de las fuentes sísmicas con las que se trabaja. Es un programa flexible que permite al usuario incluir nuevas ecuaciones de atenuación, diferentes a las disponibles en el programa. Para el caso de este estudio, las relaciones de atenuación mexicanas se definieron en el programa mediante dos procedimientos: *a)* ingresando un código en el editor disponible en el programa, incluyendo la definición de los coeficientes dependientes del periodo y *b)* mediante una base de datos con la información de la relación de atenuación para diferentes periodos,

5.3. RELACIONES DE ATENUACIÓN DEL MOVIMIENTO FUERTE DEL SUELO EN EL PROGRAMA EZ-FRISK TM

considerándose el valor de la desviación estándar del logaritmo natural del correspondiente parámetro sísmico del movimiento del terreno (PGA, PGV, intensidad, etc.).

Las características que deben cumplir las tablas y la forma de introducir las ecuaciones de atenuación mediante código, se indican en el manual de usuario del programa EZ-FRISK (Risk-Engineering, 2011) y se da una breve explicación en el apéndice D. En este trabajo se generaron bases de datos para cada periodo introduciéndolas en el programa EZ-FRISK, con la información requerida para la relación de atenuación propuesta por Arroyo *et al.* (2010); y se definieron las ecuaciones pertenecientes al modelo de atenuación de García *et al.* (2005) y Gómez-Bernal *et al.* (2012).

Definir las relaciones de atenuación resulta una etapa importante en el análisis de peligro sísmico, en este trabajo se ha considerado importante comparar los resultados que se obtuvieron con diferentes ecuaciones de atenuación. Las ecuaciones de Youngs *et al.* (1997) y Atkinson y Boore (2003) consideran los dos tipos de falla estudiados (interplaca e intraplaca), mientras que las ecuaciones de García *et al.* (2005) y Arroyo *et al.* (2010) consideran únicamente fallas tipo intraplaca e interplaca respectivamente, y mientras que la relación de atenuación de Gómez-Bernal *et al.* (2012) considera los dos tipos de falla estudiados, pero se limita a encontrar la aceleración máxima del terreno (PGA). Cada una de estas relaciones de atenuación ayudará a comprender el peligro sísmico de la región, es importante considerar que para la ciudad de Ometepec no se han realizado estudios de peligro sísmico, lo cual se ve reflejado en el Reglamento de Construcciones que posee, esta primera aproximación ayudará a definir las variables destacadas que futuros estudios puedan implementar.

6

Análisis de Peligro sísmico

*Un gramo de prevención vale más que toneladas
de curación.*

Nava, "Terremotos" 1987

6.1. Caso de aplicación: ciudad de Ometepec, Guerrero

El análisis de peligro sísmico se realizó utilizando la metodología de Cornell (1968)-McGuire (2004), implementada en el software EZ-FRISK 7.62, desarrollada por Risk Engineering Inc (Risk-Engineering, 2011), inicialmente se trabajaron tres modelos diferentes. Posteriormente, se realizaron 13 modelos cuyos resultados permitieron la interpolación de Espectros de Peligro Uniforme (EPU), utilizando la metodología desarrollada por Shepard (1968), conocida como el Método de Ponderación de distancia Inversa (IDW).

Todos los modelos fueron realizados considerando suelo firme, con velocidades de ondas de corte del suelo de $V_S = 760$ m/s, sin considerar efectos de sitio. Inicialmente se plantearon tres casos para calcular los EPU, los cuales varían en las fuentes sísmicas que aportan al peligro (para los diferentes radios de influencia de fallas: 200 km, 320 km y 500 km); los casos de estudio se describen en la tabla 6.1.

6.1. CASO DE APLICACIÓN: CIUDAD DE OMETEPEC, GUERRERO

No. de caso	1	2	3
Nombre de caso	OM-500 km	OM-320 km	OM- 200 km
Radio de influencia	500 km	320 km	200 km
Amplificación del suelo	No considerada	No considerada	No considerada
Vs	760 m/s	760 m/s	760 m/s
Fuentes falla	OX-E, OX-CI, OX-CII, OX-O, OM, AC-SM, GC, PE, MI	OX-E, OX-CI, OX-CII, OX-O, OM, AC-SM, GC	OX-CI, OX-CII, OX-O, OM, AC-SM
Fuentes área	SUB2, SUB3 IN1A, IN2A IN1B, IN2B IN1C, IN1C NAM	SUB2, SUB3 IN1A, IN2A IN1B, IN2B NAM	SUB2, SUB3 IN1A, IN2A NAM
Ec. At. 1	Atkinson-Boore (2003) Worldwide Interface and Intraslab USGS 2002		
Ec. At. 2	Youngs y otros (1997) Interface and Intraslab Rock USGS 2002		
Ec. At. 3	García y otros (2005) Intraslab Rock		
Ec. At. 4	Arroyo y otros (2010) Interface Rock		
Ec. At. 5	Gómez y otros (2012) Interface and Intraslab Rock		

Tabla 6.1 Parámetros utilizados para el Peligro Sísmico de Ometepec
Respecto a las relaciones de atenuación se consideró:

- La suma de las aceleraciones espectrales normalizadas respecto a la gravedad ($SA(g)$, por sus siglas en inglés) : de la relación de atenuación de Youngs *et al.* (1997) (en adelante referida como: Y97), para fallas interplaca e intraplaca, en cada periodo correspondiente.
- La suma de las aceleraciones espectrales normalizadas respecto a la gravedad, $SA(g)$: de la relación de atenuación de Atkinson y Boore (2003) (en adelante referida como: AYO3), para fallas interplaca e intraplaca, en cada periodo correspondiente.
- Las aceleraciones espectrales normalizadas respecto a la gravedad, $SA(g)$, para la relación de atenuación de García *et al.* (2005) (en adelante referida como: GA05), que considera únicamente fallas de tipo semi-profundas a profundas tipo intraplaca, definidas en este estudio como fallas tipo área.
- Las aceleraciones espectrales normalizadas respecto a la gravedad, $SA(g)$, para la relación de atenuación de Arroyo *et al.* (2010) (en adelante referida como: ARR10),

que considera eventos costeros de tipo interplaca, en este estudio definidas como los segmentos tipo falla.

- La relación de atenuación de Gómez-Bernal *et al.* (2012) (en adelante referida como: GO12), considera eventos costeros de tipo interplaca e intraplaca para encontrar la aceleración pico del terreno (PGA) en roca.

En las figuras 6.1 a 6.4 se muestran los EPU calculados para cuatro relaciones de atenuación respectivamente y diferentes periodos de retorno ($Tr = 20$ años, 45 años, 100 años, 475 años, 975 años y 2475 años), los espectros se obtuvieron para los tres casos estudiados, con radios de influencia de fallas $r=500$ km, 320 km y 200 km, donde: Tr es el periodo de retorno estudiado, λ es la razón de excedencia anual ($1/Tr$), p es la probabilidad de excedencia, SA es la aceleración espectral en función de la gravedad y T como periodo espectral en segundos; es posible observar:

- Los EPU obtenidos con la ecuación de Y97 (figura 6.1), para los radios de influencia de falla resultaron muy similares, incluso para grandes periodos de retorno se sobreponen.

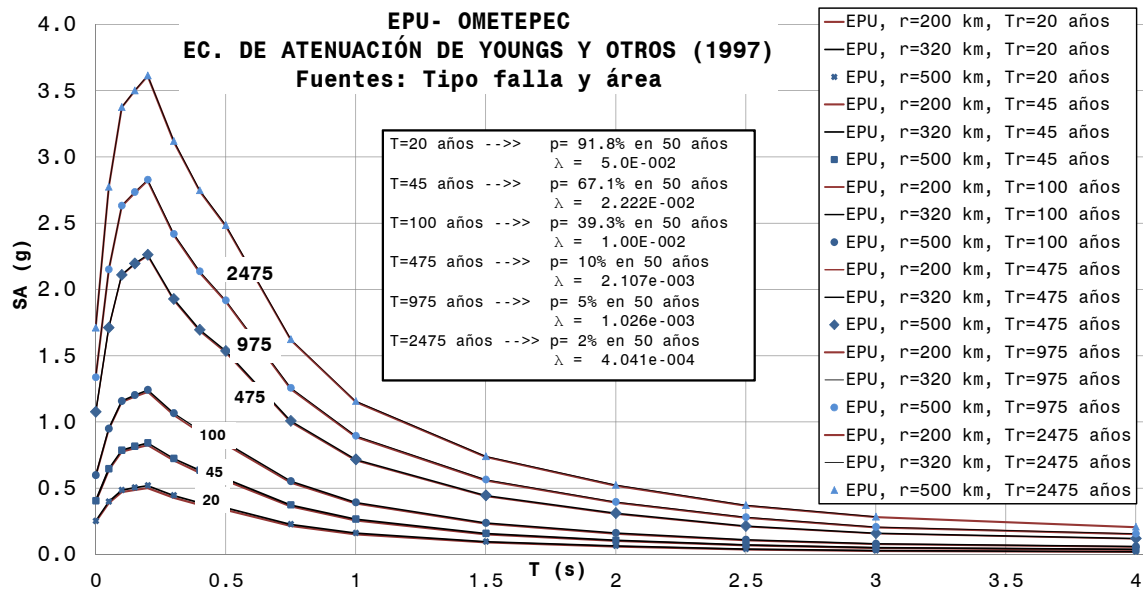


Figura 6.1 Espectros de Peligro Uniforme (EPU) para Ometepepec utilizando la relación de atenuación de Youngs *et al.* (1997).

La sobreposición de EPU se puede entender debido a que las fallas incluidas en el caso 1 ($r=500$ km) incluyen las fallas de Michoacán, Petatlán y Oaxaca Este; para

6.1. CASO DE APLICACIÓN: CIUDAD DE OMETEPEC, GUERRERO

el caso 2 ($r=320$ km) las fallas de Petatlán y Oaxaca Central, las cuales tienen tasas de recurrencia grandes y debido a la lejanía no aportan significativamente al peligro de la región. En el caso de las fallas tipo área, IN1C e IN2C, tampoco contribuyen considerablemente al peligro de la zona; por todo ello, se encontró que un radio de influencia de 500 km se sobrepone al modelo con radio de 320 km, y es posible utilizar este último para las interpolaciones de EPU.

- Para los EPU calculados con la relación de atenuación de AYB03 (figura 6.2), se observaron diferencias entre los tres radios de influencia de falla estudiados, siendo más notorias para grandes periodos de retorno ($T_r > 100$ años). Los EPU para el caso 1 ($r=200$ km), presentaron menores valores de aceleración espectral (línea roja), debido a que se tienen consideradas menos fuentes de falla que en los casos 2 y 3. Los EPU para los casos 2 y 3, se encuentran sobre-puestos, ya que algunas de las fallas incluidas en el modelo 3, tienen grandes periodos de retorno y se encuentran bastante lejanas del sitio en estudio, por lo que la atenuación de los efectos de las mismas es mayor, siendo estas las fallas de PE y MI.

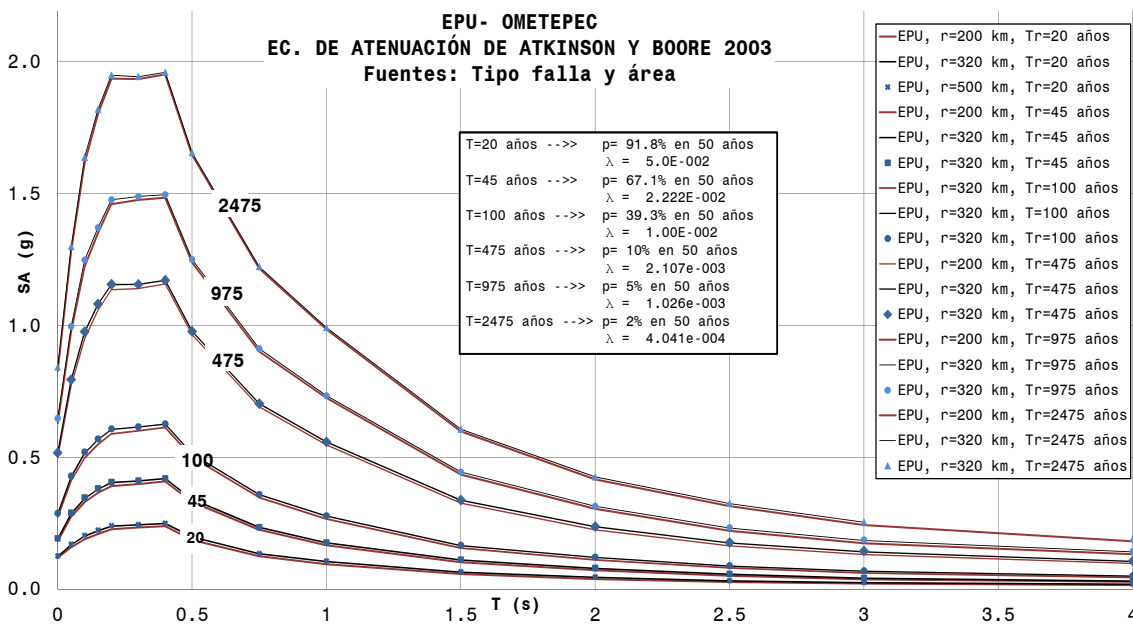


Figura 6.2 EPU para Ometepec utilizando la relación de atenuación de Atkinson y Boore (2003).

- En caso de los EPU calculados con la relación de atenuación de GA05 que sólo considera fallas de tipo intraplaca, los efectos de aceleración espectral fueron mucho menores a los obtenidos con las ecuaciones que consideran los dos tipos de falla para los diferentes periodos de retorno. En la figura 6.3 se puede observar la contribución de fallas tipo intraplaca al peligro total. Se observa un incremento de aceleración espectral más notable en periodos menores a 0.5 s, esto para periodos de retorno ≥ 475 años. Para el caso 3 ($r=200$ km) los EPU son menores a los EPU obtenidos con los modelos 1 y 2; se aprecia un incremento de aceleraciones espectrales al considerar un número mayor de fallas de tipo intraplaca que en el caso 3 (se adicionan las fallas IN1B, IN2B, IN1C, IN2C).

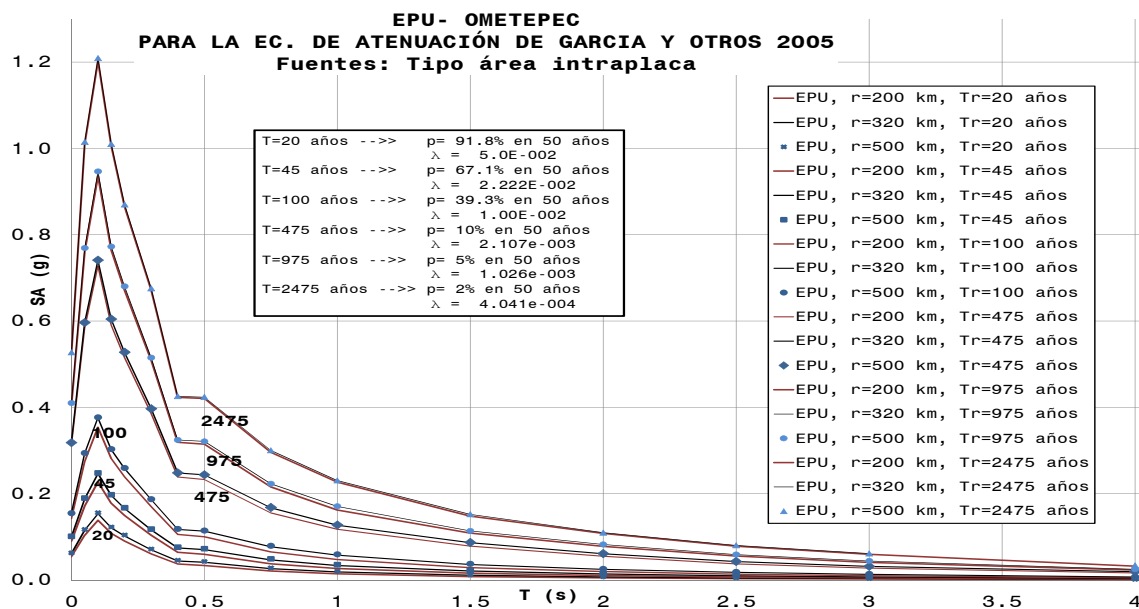


Figura 6.3 EPU para Ometepec utilizando la relación de atenuación de García *et al.* (2005).

- Para el caso de la relación de atenuación de ARR10, que considera únicamente fallas de tipo interplaca, los EPU mostrados en la figura 6.4 llegan a superponerse para los tres modelos de fallas, nuevamente se muestra la influencia de las fuentes cercanas (Oaxaca Central II, Oaxaca Occidental, Ometepec, Acapulco- San Marcos y SUB 3) en los EPU.

Particularmente se muestra una tendencia de incrementar las aceleraciones espectrales para periodos de retorno $Tr \geq 475$ años y periodos menores a 0.5 s, sin embargo,

6.1. CASO DE APLICACIÓN: CIUDAD DE OMETEPEC, GUERRERO

los resultados para para periodos de retorno $Tr \leq 100$ años se encuentran dentro del intervalo de aceleraciones espectrales obtenidas con las ecuaciones de Y97 y AYB03. Estos resultados se pueden observar en las gráficas 6.5, 6.6 y 6.7 para periodos de retorno de 20 años ($p= 5E-02$ con 91.8 % de probabilidad en 50 años), 45 años ($p= 2.22 E-02$ con 67.1 % de probabilidad en 50 años) y 100 años ($p= 1.0E-02$ con 39.3 % de probabilidad en 50 años) respectivamente.

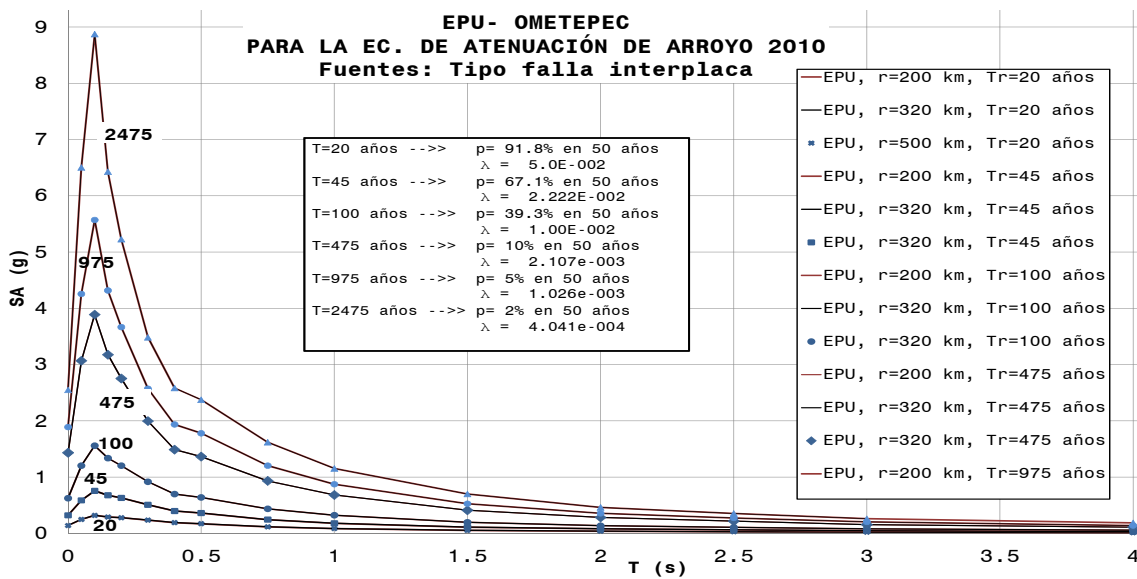


Figura 6.4 EPU para Ometepec con la relación de atenuación de Arroyo *et al.* (2010).

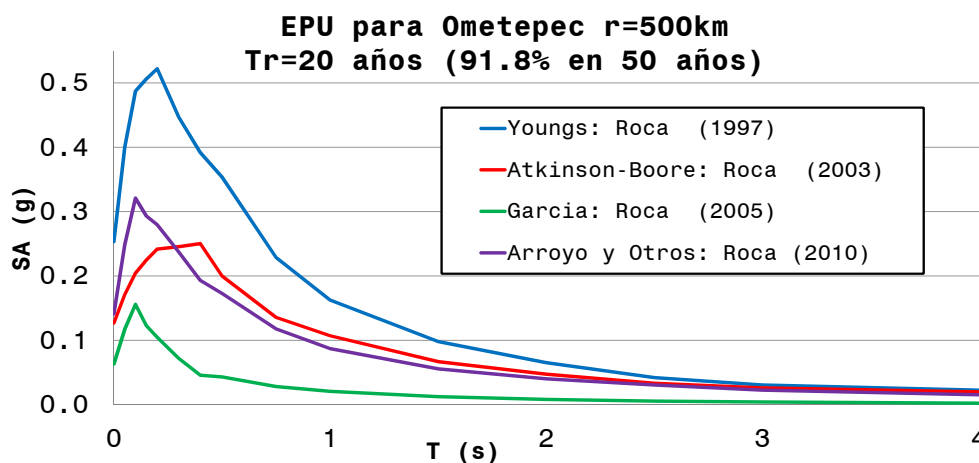


Figura 6.5 EPU para Ometepec, para cuatro relaciones de atenuación, $Tr = 20$ años y el modelo de fuentes sísmicas $r = 500$ km.

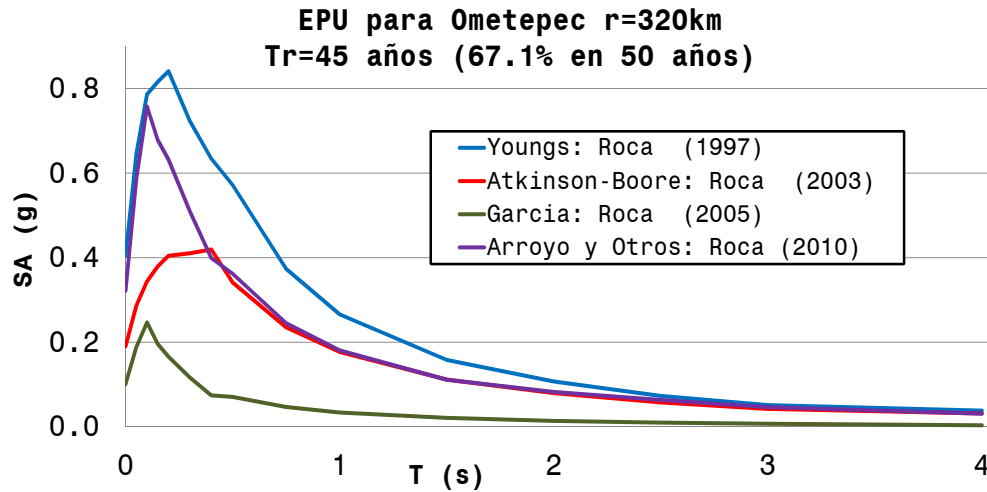


Figura 6.6 EPU ara Ometepec, para cuatro relaciones de atenuación con $T_r=45$ años y $r=320\text{km}$.

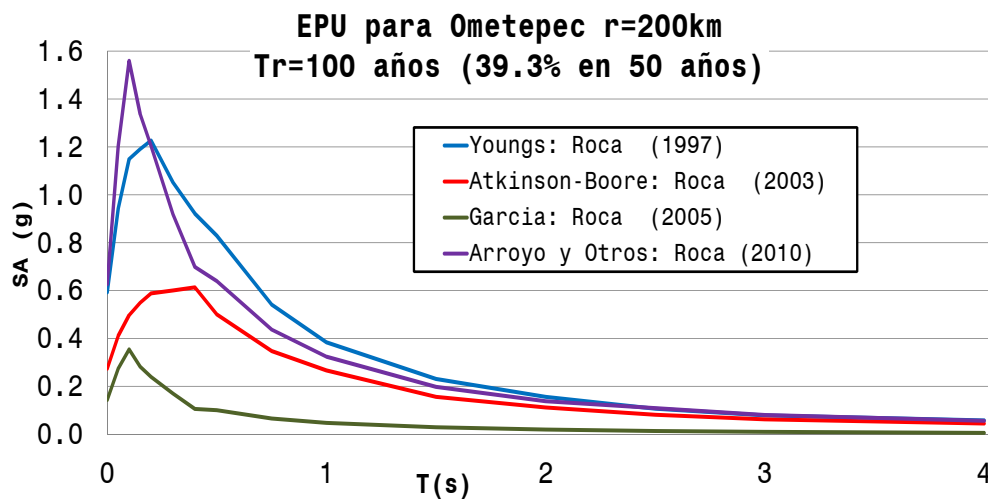


Figura 6.7 EPU para Ometepec, utilizando cuatro relaciones de atenuación para $T_r=100$ años y $r=200\text{km}$.

- Para entender el incremento de aceleración espectral para periodos menores a 0.5 s, se estudiaron los EPU de acuerdo al tipo de fallas (interplaca e intraplaca), para los diferentes periodos de retorno y modelos de fuentes sísmicas estudiados. En la gráfica 6.8 se muestran los EPU para el modelo 2 ($r=320\text{ km}$) y un periodo de retorno de 100 años, considerando fallas tipo intraplaca. Las aceleraciones espectrales (SA) obtenidas con la ecuación de AYB03 llegan a empatar con las SA(g) de la ecuación de GA05 para periodos mayores a 1 s y para periodos menores a 0.5 s la ecuación de AYB03

6.1. CASO DE APLICACIÓN: CIUDAD DE OMETEPEC, GUERRERO

tiende a sub-estimar las aceleraciones espectrales en mas del 50 % que el resto de las ecuaciones. Para periodos mayores a 0.1 s, las SA(g) de GA05 y Y97 tienen se encuentran sobrepuestas, y para periodos mayores la relación de atenuación de Y97 presenta mayores aceleraciones espectrales que las restantes. Para periodos mayores a 2.5 s los EPU presentan un intervalo de aceleraciones espectrales mas reducido.

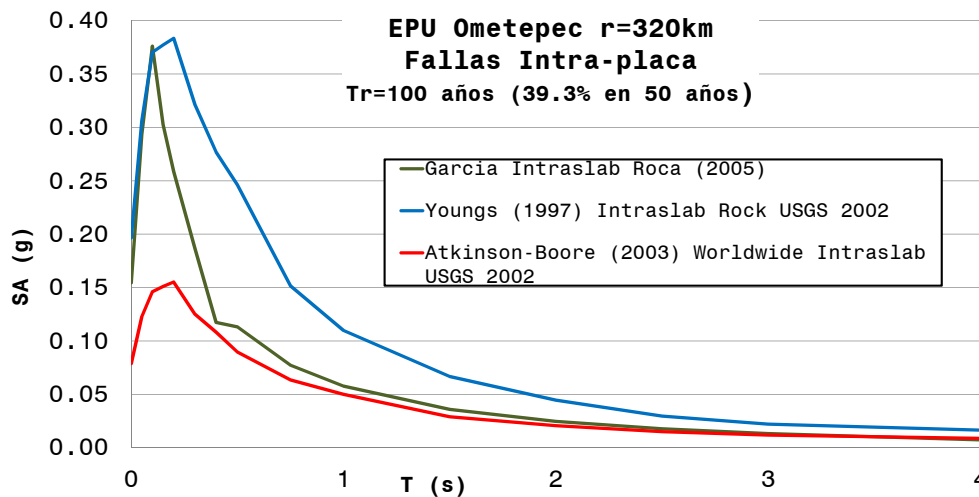


Figura 6.8 EPU para Ometepec, estudiando las fallas de tipo intraplaca para tres ecuaciones de atenuación, con $T_r=100$ años y $r=320$ km.

- En la figura 6.9 se muestran los EPU para el modelo 2 ($r=320$ km) y un periodo de retorno de 100 años, considerando fallas tipo interplaca. Para periodos espectrales menores a 0.5 s los espectros presentan valores pico entre 0.1 s y 0.4 s. La ecuación de AYB03 presenta menores aceleraciones espectrales que la ecuación de Y97, las diferencias observadas se deben a diferencias en las bases de datos, las técnicas de regresión utilizadas para obtener los coeficientes dependientes del periodo y la forma del funcional adoptado para obtener la ecuación que define a relación de atenuación en cada caso. Se puede observar la tendencia de la ecuación de ARR10 a incrementar las aceleraciones espectrales para periodos menores a 0.5 s, ubicándose el pico en 0.1 s, este incremento se acentúa a medida que los periodos de retorno se incrementan.

En la figura 6.10, se puede observar la contribución que cada falla tiene para el peligro de Ometepec con $r=320$ km con $T=0.2$ s, considerando las aceleraciones espectrales para la relación de atenuación de Y97. La contribución de las fallas de Petatlán y Oaxaca Este es

menor que el resto de las fallas y el segmento Ometepec (línea verde oscuro con puntos negros rellenos) es una de las que más contribuyen al peligro de la región.

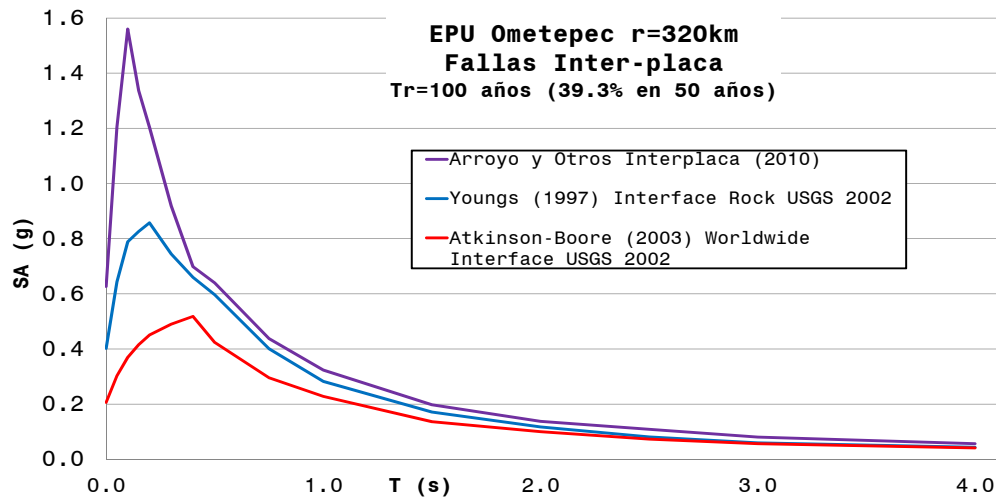


Figura 6.9 EPU para Ometepec, estudiando las fallas de tipo interplaca, para tres ecuaciones de atenuación con $T_r=100$ años y $r=320\text{km}$.

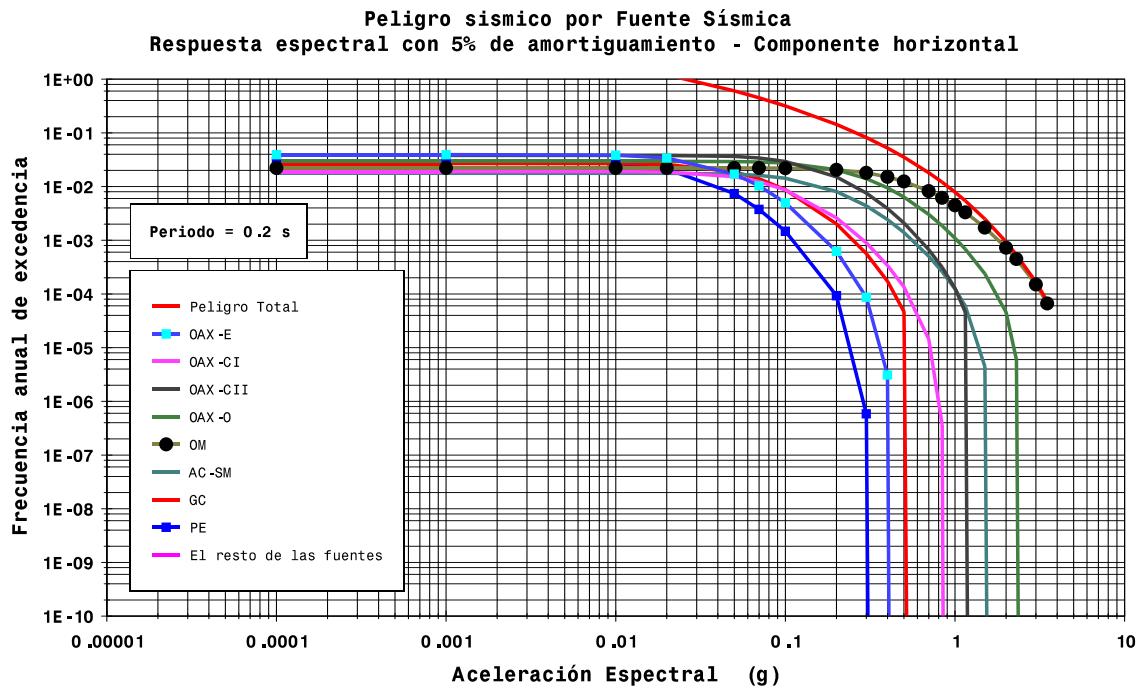


Figura 6.10 Gráfica de peligro para $T=0.2$ s y $r=320$ km. Fuentes sísmicas tipo falla.

En los casos estudiados, para el modelo $r=200$ km, las fallas muy cercanas y con alta tasa de actividad son las que aportan en mayor porcentaje al peligro sísmico, sin embargo, en este

6.1. CASO DE APLICACIÓN: CIUDAD DE OMETEPEC, GUERRERO

estudio se consideró importante abarcar todas las fallas que contribuyan sustancialmente con el peligro sísmico, es decir, se incluyeron fallas en un radio de 320 km desde Ometepec.

La figura 6.11 muestra la contribución al peligro sísmico de las fuentes tipo área, para el caso con radio de influencia de 320 km, se observa que las fuentes IN2A y SUB3 contribuyen de gran manera, lo que indica que a menor distancia epicentral de las fuentes al sitio se tornan importantes los eventos de subducción.

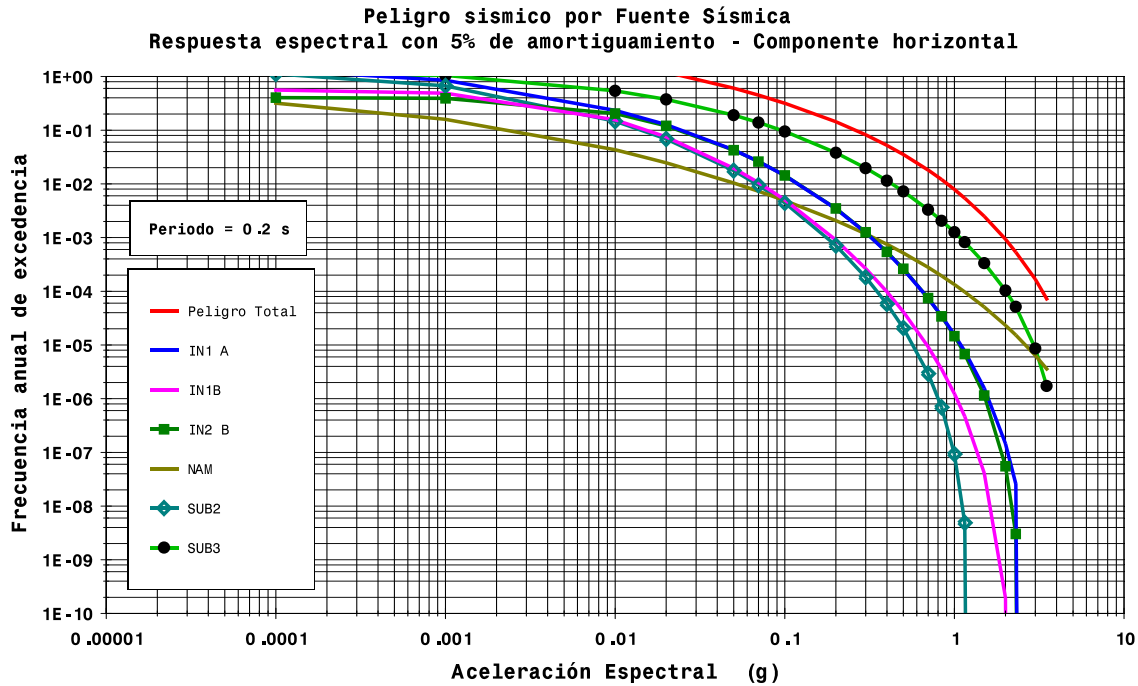


Figura 6.11 Gráfica de peligro para $T=0.2$ s y $r=320$ km. Fuentes sísmicas tipo área.

Para el caso de estudio $r=500$ km y $T=0.3$ s, en la figura 6.12 se puede observar la contribución de las fuentes tipo área, considerando las aceleraciones espectrales para la relación de atenuación de Y97. En este caso las fuentes IN1C e IN2C contribuyen en menor medida al peligro de la región, mientras que las fuentes que más contribuyen son IN2A, IN1A e IN2B, indicando que los eventos intraplaca de profundidades intermedias cercanos a los epicentros de la zona definida por Núñez-Cornú (1996) tienen gran influencia en el peligro sísmico de Ometepec.

La figura 6.13 permite observar la recurrencia de las diferentes fuentes sísmicas de la región, es notable que las fuentes tipo falla tienen un rango de magnitudes que varía poco, casi constantes. Sin embargo, las fallas que comprenden superficies de ruptura más amplias

cubren un rango de magnitudes amplio, siendo importantes en el análisis de peligro sísmico.

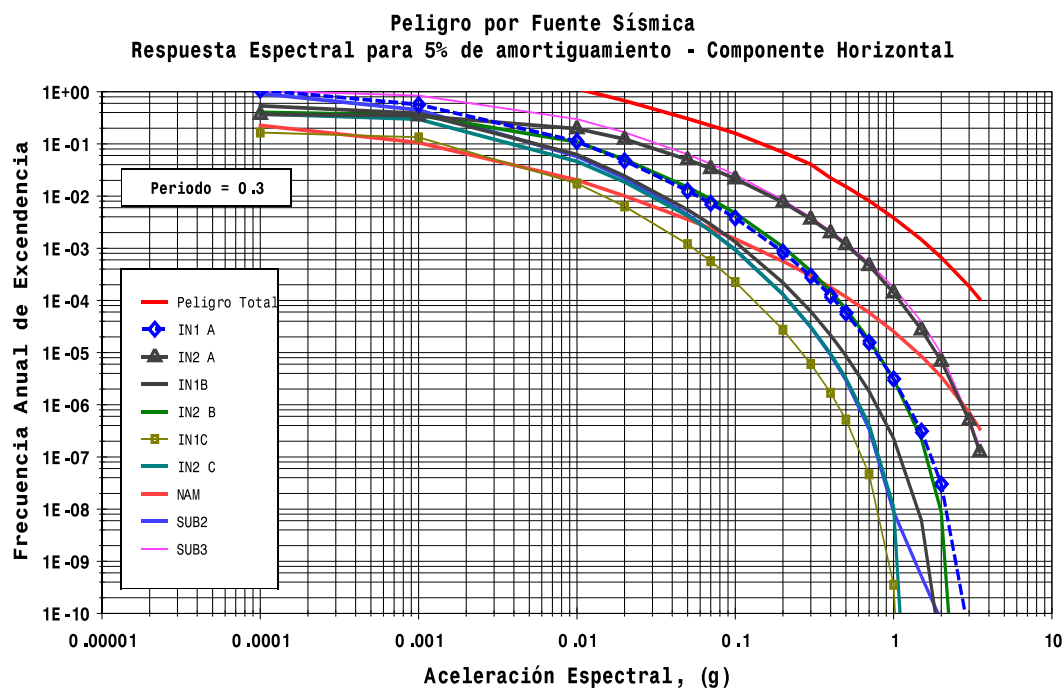


Figura 6.12 Gráfica de peligro para $T=0.3$ s y $r=500$ km. Fuentes sísmicas tipo área.

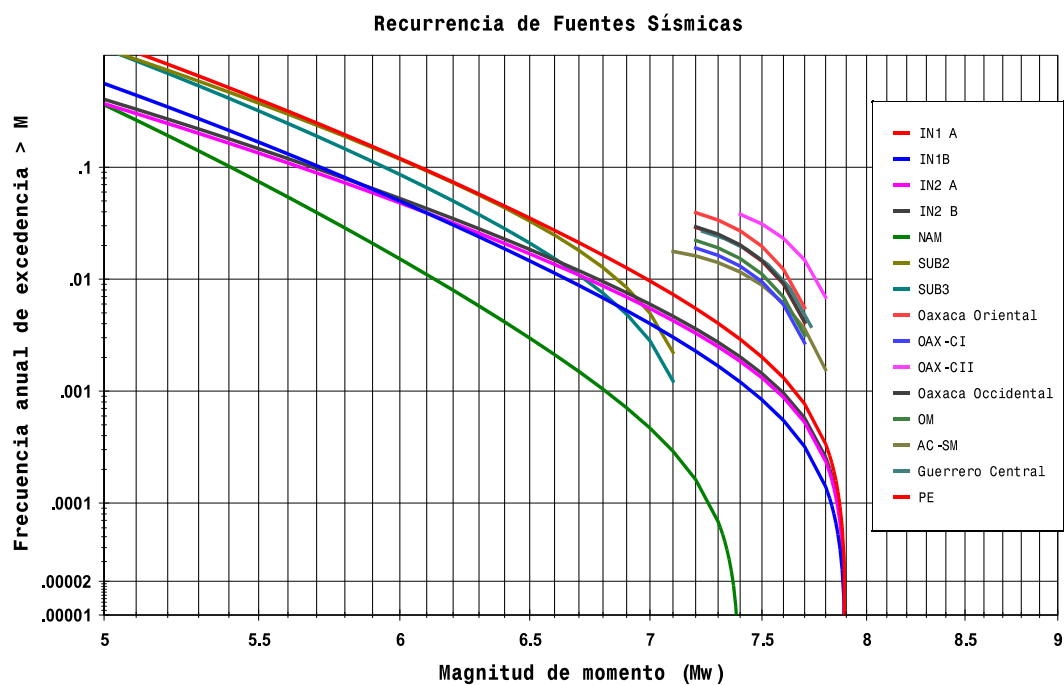


Figura 6.13 Recurrencia de las fuentes sísmicas consideradas en el estudio. Caso de estudio: $r=500$ km.

6.2. Espectros de diseño

Se obtuvieron los espectros de diseño para los grupos A y B de estructuras considerando suelo firme (roca), del Manual de Obras Civiles de la CFE (CFE, 2008), para un estado límite de colapso. Se utilizó el software PRODISIS, con las coordenadas del sitio (Ometepec, Latitud=16°41'7.57"N y Longitud=98°24'19.14"W), se obtuvo la aceleración máxima del terreno en roca para un periodo de retorno de 990 años que el programa calcula para las condiciones del sitio, utilizando los parámetros mostrados a continuación,:

- Aceleración máxima en roca, Grupo B, $a_r=0.306g$.
- Aceleración máxima en roca, Grupo A, $a_r=0.458g$.
- Ordenada espectral máxima, Grupo B, $c = 0.764g$.
- Ordenada espectral máxima, Grupo A, $c = 1.146g$.
- Límite inferior de la meseta del espectro de diseño, $T_a = 0.1s$.
- Límite superior de la meseta del espectro de diseño, $T_b = 0.6s$.
- Factor de amortiguamiento $\beta = 1$.
- Parámetro que controla la caída de las ordenadas espectrales $k = 2$.
- Factor de respuesta $F_R = 2.5$, factor de velocidad $F_v = 1$.
- Factor de distancia, Grupo B, $F_d = 0.749$.
- Factor de distancia, Grupo A, $F_d = 1$.
- Factor de sitio $F_s = 1$, factor de no linealidad $F_{nl} = 1$.

En las figuras 6.14 a 6.17 se comparan los espectros de diseño obtenidos con el programa PRODISIS considerando estructuras del Grupo A y B según el MDOC-2008, con los EPU obtenidos con el modelo 2 ($r=320$ km) utilizando las diferentes ecuaciones de atenuación; los coeficientes espectrales del Reglamento de Construcciones del Municipio de Ometepec (RCMO, 2009) (Artículo 316°), tanto para estructuras del grupo A y B, para fines comparativos se dibujaron como líneas rectas constantes para todos los periodos, permitiendo comparar los PGA de los EPU con los respectivos coeficientes sísmicos; en el RCMO (2009) no se cuenta con espectros de diseño, la única distinción que el RCMO (2009) toma en cuenta es la clasificación de tres tipos de suelo, según el Artículo 315°:

- Zona I: Terreno firme, tal como tepetate, arenisca medianamente cementada, arcilla muy compacta. Se incluye la roca basal.
- Zona II: Suelo de baja rigidez, tal como arenas no cementadas, arcillas de mediana capacidad. Depósitos aluviales.
- Zona III: Arcillas blandas muy comprensibles. Depósitos de barro en las costas.

Los coeficientes sísmicos para diseño especificados en el RCMO (2009) se indican en la tabla 6.2 según el tipo de suelo que se tenga.

C (g)	Zona I	Zona II	Zona III
Grupo A	0.66	1.29	1.62
Grupo B	0.44	0.86	1.08

Tabla 6.2 Coeficientes de diseño sísmico para Ometepec.

En la figura 6.14 se comparan los EPU obtenidos con la relación de atenuación de Y97 y los espectros de diseño del MDOC-CFE (CFE, 2008) para Ometepec en suelo firme, con los coeficientes espectrales del Reglamento de Construcciones del Municipio de Ometepec (RCMO, 2009, Art. 316°).

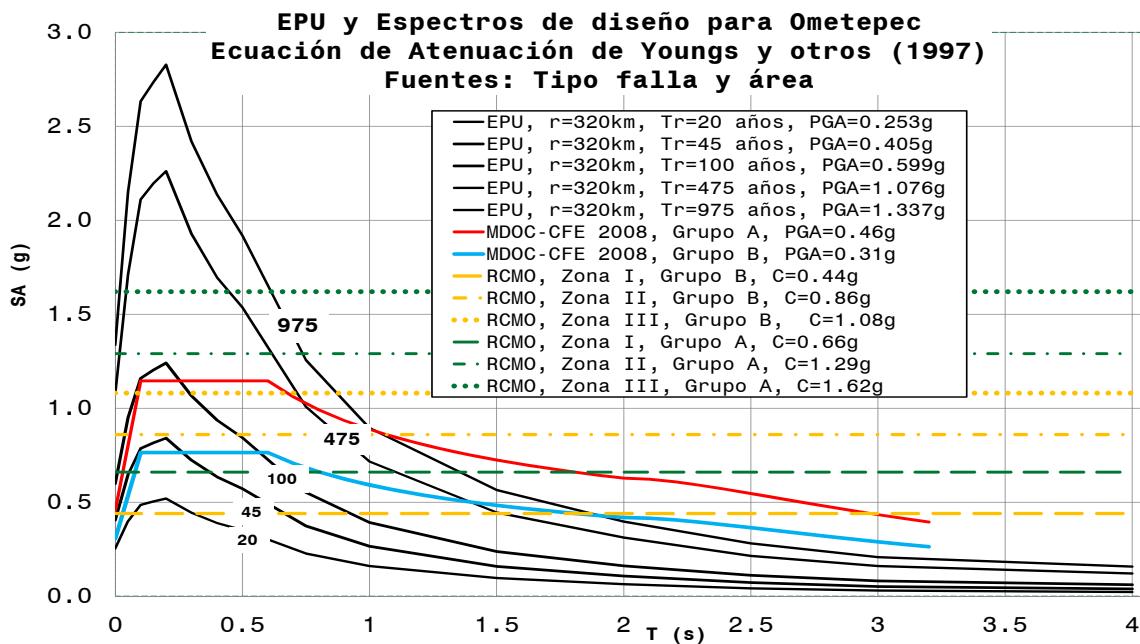


Figura 6.14 Espectros de diseño calculados con PRODISIS, comparados con los EPU para Ometepec con Y97 y los coeficientes sísmicos del RCMO (2009).

6.2. ESPECTROS DE DISEÑO

- El espectro del MDOC-CFE para el Grupo A presenta similitud con el EPU para $T_r=100$ años, existe similitud entre el EPU para $T_r=45$ años con el espectro de MDOC Grupo B; para un periodo de 0.2 s los picos de aceleración para los EPU son mayores, estos valores se pueden observar en la tabla 6.3.

-	EPU	EPU	EPU	EPU	EPU	MDOC-CFE	MDOC-CFE
-	T=20 años	T=45 años	T=100 años	T=475 años	T=975 años	Grupo A	Grupo B
T(seg)	SA(g)	SA(g)	SA(g)	SA(g)	SA(g)	SA(g)	SA(g)
PGA	0.25	0.41	0.60	1.07	1.34	0.46	0.31
0.2	0.52	0.84	1.24	2.25	2.83	1.15	0.76

Tabla 6.3 Comparación de PGA de EPU con Y97 y espectros de diseño del MDOC.

- En todos los casos para periodos mayores a 1 s, los EPU tienden a presentar ordenadas espectrales inferiores a los espectros de diseño para ambos grupos, lo cual se explica debido a los coeficientes que afectan tanto a la magnitud como la distancia a la superficie de falla (c_1 , c_2 , c_3 , etc.) de las diferentes relaciones de atenuación, dependientes del periodo, las cuales reducen gradualmente.
- Los EPU para $T_r=475$ años y $T_r=975$ años para periodos menores a 1 s quedna por encima del espectro de diseño del MDOC-CFE para estructuras del Grupo A.
- Para estructuras del Grupo B, con un periodo de retorno de 45 años, la aceleración máxima del terreno (PGA) obtenida es 0.405g, que es mayor a la calculada con el espectro de MDOC-CFE con 0.31g y menos al coeficiente sísmico del RCMO en zona I con 0.44 g.
- Para estructuras del Grupo A, con un periodo de retorno de 475 años, la aceleración máxima del terreno (PGA) obtenida es 1.07g, que es mayor a la calculada con el espectro de MDOC-CFE con 0.46g y al coeficiente sísmico del RCMO en zona I con 0.66 g. Lo que indica que para una estructura con gran importancia el coeficiente sísmico de diseño debe ser mayor.

En la figura 6.15 se comparan los EPU obtenidos con la relación de atenuación de AYB03, los espectros de diseño del MDOC (CFE, 2008) para Ometepe en suelo firme y los coeficientes

espectrales del Reglamento de Construcciones del Municipio de Ometepec (RCMO, 2009, Art. 316°):

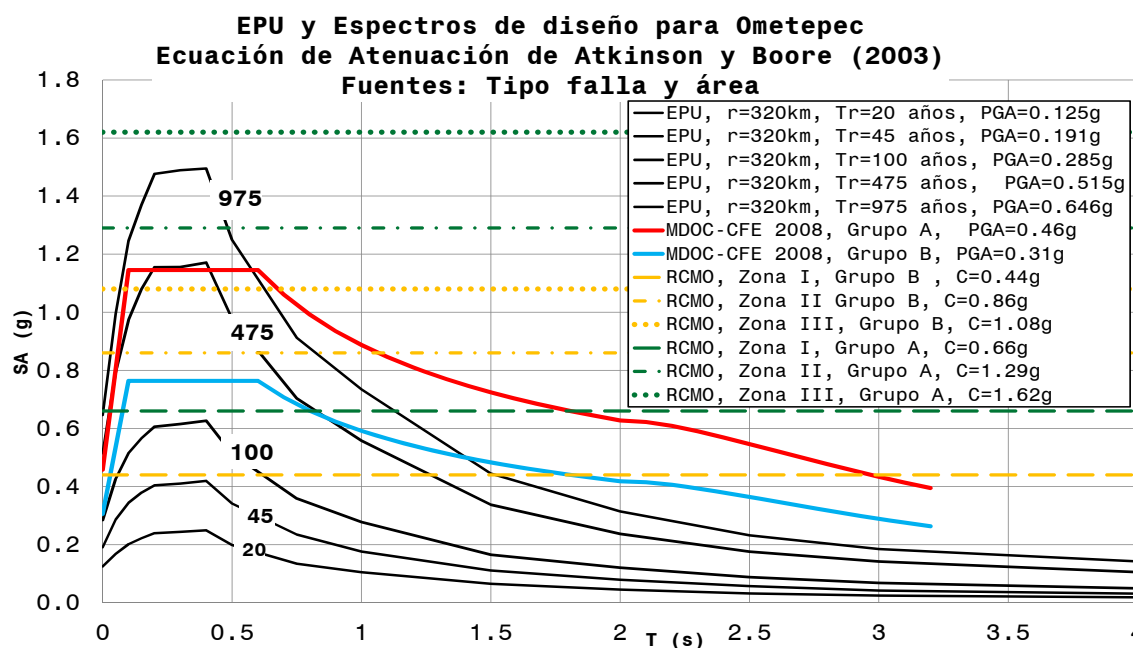


Figura 6.15 Espectros de diseño calculados con PRODISIS, comparados con los EPU para Ometepec con AYB03 y los coeficientes sísmicos del RCMO (2009).

- El espectro del MDOC-CFE para el Grupo A está asociado con el EPU para $T_r=475$ años, y el del Grupo B con el EPU para $T_r=100$, en este último caso el PGA para el espectro del MDOC-CFE empata con la magnitud del PGA del EPU, estos valores se pueden observar en la tabla 6.4.

-	EPU	EPU	EPU	EPU	EPU	MDOC-CFE	MDOC-CFE
-	$T=20$ años	$T=45$ años	$T=100$ años	$T=475$ años	$T=975$ años	Grupo A	Grupo B
T(seg)	SA(g)	SA(g)	SA(g)	SA(g)	SA(g)	SA(g)	SA(g)
PGA	0.13	0.19	0.29	0.52	0.65	0.46	0.31
0.2	0.24	0.40	0.61	1.16	1.48	1.15	0.76

Tabla 6.4 Comparación de PGA de EPU con AYB03 y espectros de diseño del MDOC.

- Para periodos mayores a 0.6 s, los EPU tienden a presentar ordenadas espectrales inferiores a el espectro de diseño del MDOC (CFE, 2008) para grupo A y a partir de 1.4 s para el Espectro del Grupo B..

6.2. ESPECTROS DE DISEÑO

- Para estructuras del Grupo B, con un periodo de retorno de 100 años, la aceleración máxima del terreno (PGA) obtenida es 0.29g, que es menor a la calculada con el espectro de MDOC-CFE con 0.31g y menor al coeficiente sísmico del RCMO en zona I con 0.44 g.
- Para estructuras del Grupo A, con un periodo de retorno de 475 años, la aceleración máxima del terreno (PGA) obtenida es 0.52g, que es mayor a la calculada con el espectro de MDOC-CFE con 0.46g y menor al coeficiente sísmico del RCMO en zona I con 0.66 g.

En la figura 6.16 se comparan los EPU obtenidos con la relación de atenuación de GA05 con los espectros de diseño del MDOC (CFE, 2008) para Ometepec en suelo firme y los coeficientes espectrales del Reglamento de Construcciones del Municipio de Ometepec (RCMO, 2009, Art. 316°). Cabe resaltar que la ecuación de GA05 solo considera fallas tipo intraplaca (tipo área), por lo que el peligro es menor en comparación de las dos ecuaciones de atenuación estudiadas anteriormente. Se puede observar:

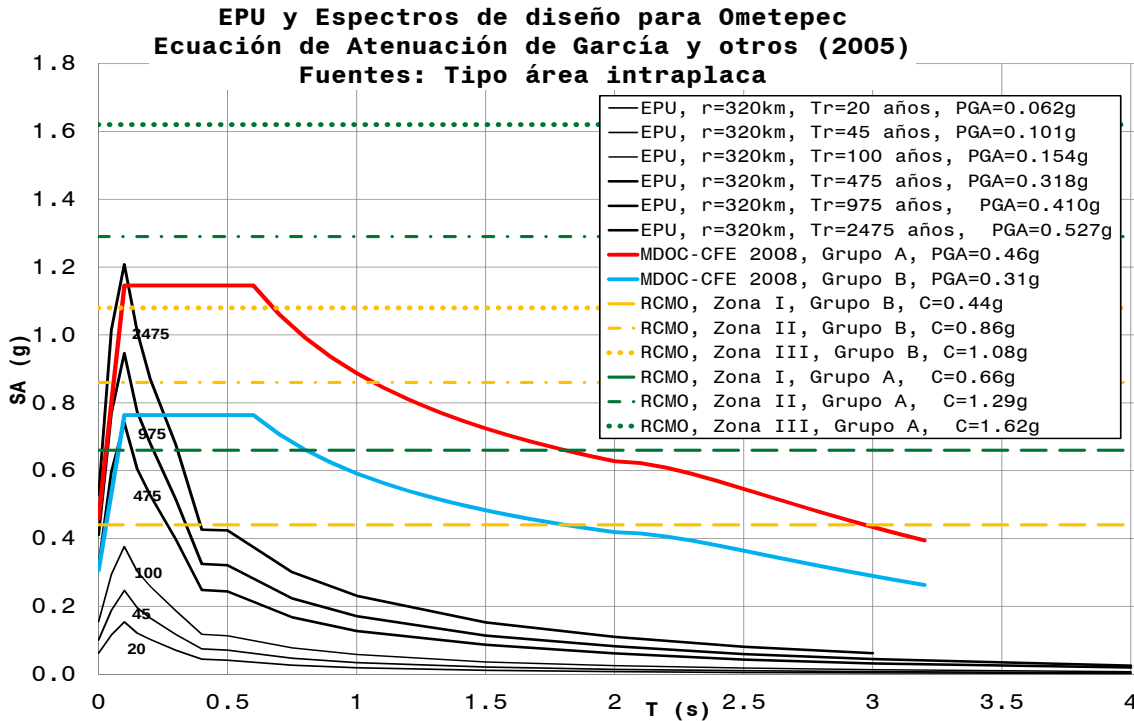


Figura 6.16 Espectros de diseño calculados con PRODISIS, comparados con los EPU para Ometepec con GA05 y los coeficientes sísmicos del RCMO (2009).

- Para periodos menores a 0.1 s, las aceleraciones espectrales (SA(g)) del espectro del MDOC-CFE para el Grupo A, empatan con las SA(g) del EPU para $T_r=2475$ años. Para el mismo intervalo de periodos, el espectro de MDOC-CFE del Grupo B empatan las SA(g) con el EPU para $T_r=475$ años, en este caso el pico de aceleración para el espectro del MDOC-CFE empatan con el EPU, estos valores se pueden observar en la tabla 6.5.
- Para periodos mayores a 0.3 s, los EPU tienden a presentar ordenadas espectrales inferiores a los espectros de diseño del MDOC- CFE para ambos grupos, debido a que en los EPU calculados con la relación de atenuación de GA05 no se consideran las fallas de movimiento interplaca.

-	EPU	EPU	EPU	EPU	EPU	MDOC-CFE	MDOC-CFE
-	T=45 años	T=100 años	T=475 años	T=975 años	T=2475 años	Grupo A	Grupo B
T(seg)	SA(g)	SA(g)	SA(g)	SA(g)	SA(g)	SA(g)	SA(g)
PGA	0.11	0.15	0.32	0.41	0.53	0.46	0.31
0.1	0.25	0.38	0.74	0.95	1.21	1.15	0.76

Tabla 6.5 Comparación de PGA de EPU con GA05 y espectros de diseño del MDOC.

- Para estructuras del Grupo B, con un periodo de retorno de 100 años, la aceleración máxima del terreno (PGA) obtenida es 0.15g, que es menor a la calculada con el espectro de MDOC-CFE con 0.31g y menor al coeficiente sísmico del RCMO en zona I con 0.44 g.
- Para estructuras del Grupo A, con un periodo de retorno de 475 años, la aceleración máxima del terreno (PGA) obtenida es 0.32g, que es menor a la calculada con el espectro de MDOC-CFE con 0.46g y menor al coeficiente sísmico del RCMO en zona I con 0.66 g.. En ambos casos, tanto para estructuras del Grupo A como B, las PGA calculadas con GA05 solo muestran la contribución de fuentes tipo intraplaca al peligro de la región, por lo que sus valores son menores que los presentados según la reglamentación.

En la figura 6.17 se comparan los EPU obtenidos con la relación de atenuación de ARR10, los espectros de diseño del MDOC (CFE, 2008) para Ometepec en suelo firme y los coeficientes

6.2. ESPECTROS DE DISEÑO

espectrales del Reglamento de Construcciones del Municipio de Ometepec (RCMO, 2009, Art. 316°). Cabe resaltar que la relación de atenuación ARR10 solo considera fallas tipo interplaca (tipo falla). Se puede observar:

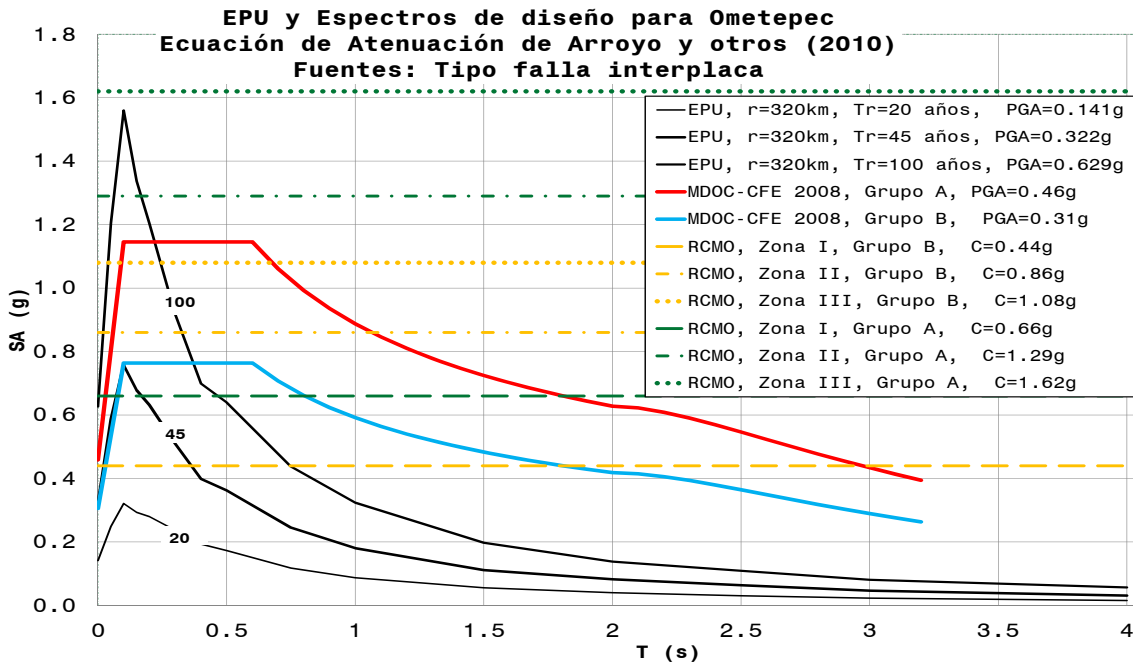


Figura 6.17 Espectros de diseño calculados con PRODISIS, comparados con los EPU para Ometepec con ARR10 y los coeficientes sísmicos del RCMO (2009).

- El espectro del MDOC-CFE para el Grupo A no se encuentra asociado con algún EPU, para periodos menores a 0.3 s, se ubica entre el EPU para $Tr=100$ años y el de $Tr=45$ años; mientras que el espectro del Grupo B, se encuentra asociado con el EPU para un $Tr=45$ años, en este caso el pico de aceleración para el espectro del MDOC empata con del EPU, estos valores se pueden observar en la tabla 6.6.
- Para periodos mayores a 0.4 s, los EPU tienden a presentar ordenadas espectrales inferiores a los espectros de diseño del MDOC para ambos grupos.
- La aceleración máxima del terreno (PGA) para el EPU de $Tr=45$ años es de 0.32g, la cual es menor al coeficiente sísmico del RCMO para el Grupo B con 0.44g, y al espectro del Grupo A de la CFE con 0.46g, pero coincide con el del Grupo B con 0.31g.
- Para estructuras del Grupo B, con un periodo de retorno de 45 años, la aceleración máxima del terreno (PGA) obtenida es 0.32g, que es mayor a la calculada con el

espectro de MDOC-CFE con 0.31g y menor al coeficiente sísmico del RCMO en zona I con 0.44 g. A partir de periodos de retorno $T_r > 100$ años, los PGA de los EPU calculados con ARR10, son mayores que los PGA de los espectros de diseño y que el resto de las ecuaciones de atenuación.

-	EPU	EPU	EPU	MDOC-CFE	MDOC-CFE
-	T=20 años	T=45 años	T=100 años	Grupo A	Grupo B
T(s)	SA(g)	SA(g)	SA(g)	SA(g)	SA(g)
PGA	0.14	0.32	0.63	0.46	0.31
0.1	0.32	0.76	1.56	1.15	0.76

Tabla 6.6 Comparación de PGA de EPU con ARR10 y espectros de diseño del MDOC.

Finalmente en la tabla 6.7 se comparan las aceleraciones pico (PGA) de las diferentes ecuaciones de atenuación, incluyendo los resultados obtenidos con la relación de atenuación de Gómez-Bernal *et al.* (2012) para PGA y en la tabla 6.8 se comparan los PGA según el MDOC (CFE, 2008) y el RCMO (RCMO, 2009) para estructuras del Grupo A y Grupo B:

PGA (g)	T=20 años	T=45 años	T=100 años	T=475 años	T=975 años	T=2475 años
Youngs y otros (1997)	0.25	0.41	0.60	1.08	1.34	1.71
Atkinson y Boore (2003)	0.13	0.20	0.29	0.52	0.65	0.84
García y otros (2005)	0.06	0.10	0.15	0.32	0.41	0.53
Arroyo y otros (2010)	0.14	0.32	0.63	1.43	1.90	2.55
Gomez y otros (2012)	0.16	0.28	0.31	0.33	0.34	0.36

Tabla 6.7 Comparación de PGA con las diferentes ecuaciones de atenuación.

PGA (g)	Grupo A	Grupo B
Reglamento de Ometepec 2009	0.66	0.44
MDOC-CFE 2008	0.46	0.31

Tabla 6.8 Comparación de PGA obtenidas según el MDOC (CFE, 2008) y el RCMO.

De la tabla 6.7 se observa que para $T_r < 100$ años los PGA de las diferentes ecuaciones de atenuación presentan tendencias similares, y para periodos de retorno mayores se acentúan las diferencias, siendo mas notorio para el caso de Y97 y de ARR10. Se observa una tendencia

6.3. INTERPOLACIÓN IDW

similar entre las ecuaciones de atenuación de AYB03 y GA05, mostrándose más estable la relación de atenuación de AYB03 al considerar tanto fallas tipo interplaca e intraplaca.

Los PGA encontrados con el MDOC (CFE, 2008) se presentan para un periodo de retorno de 900 años, al compararlo con los EPU, se observa que para el Grupo A se tiene una similitud con la relación de atenuación de GA05, para el grupo B con la relación de atenuación de GO12. El RCMO (2009), presenta coeficientes sísmicos elevados en relación con el MDOC, para el Grupo A empata con el PGA de la ecuación de AYB03 para $T_r=475$ años y ARR10 para $T_r=100$ años; mientras que para el Grupo B, con la relación de atenuación de Y97 para $T_r=45$ años y AYB03 para $T_r=475$ años.

6.3. Interpolación IDW

Con el objetivo de obtener una malla de puntos con Espectros de Peligro Uniforme (EPU) conocidos para el segmento Ometepec, que puede ser ampliada e implementada para uso público (como ocurre con el reglamento de diseño NBCC (2005) de Canadá), se ha presentado y evaluado una metodología alternativa para generar EPU a partir de valores conocidos, utilizando el Método de Ponderación de distancia inversa (IDW) (Shepard, 1968). Se realizó la interpolación de EPU para Ometepec tanto para la relación de atenuación de Youngs *et al.* (1997) y como la de Atkinson y Boore (2003), ya que permiten calcular la contribución de fallas tipo intraplaca como interplaca. Se consideraron tres modelos con diferentes distancia para los puntos de interpolación respecto a Ometepec: ≤ 15 km, ≤ 30 km y ≤ 70 km ; y se calibró el factor de potencia p . Se observó que a pesar de contar con un número reducido de puntos, se obtuvieron buenas aproximaciones de los EPU debido a las cortas distancias en los dos primeros modelos, sin embargo, los resultados pueden ser más precisos incrementando el número de puntos; se pudo encontrar, que el factor de potencia p puede tomar un valor constante de 2 y permitir buenas aproximaciones en todos los casos.

6.3.1. Modelo 1: Puntos de interpolación a distancias menores de 15 km

Para este modelo, se estudió la influencia de fuentes sísmicas en un radio de 200 km desde cada punto en estudio, se selecciono este radio de influencia para poder validar el método con

diferentes escenarios sísmicos.

En la figura 6.18 se observa la distribución de los puntos de interpolación para este modelo, en la tabla 6.9 se describen las coordenadas y distancias a cada punto desde Ometepec y en la tabla 6.10 se presentan los parámetros utilizados para encontrar los EPU en cada sitio. Estos EPU fueron calculados para periodos de retorno de 475 años, para poder ejemplificar la metodología y calcular EPU para ciudades cercanas a Ometepec.

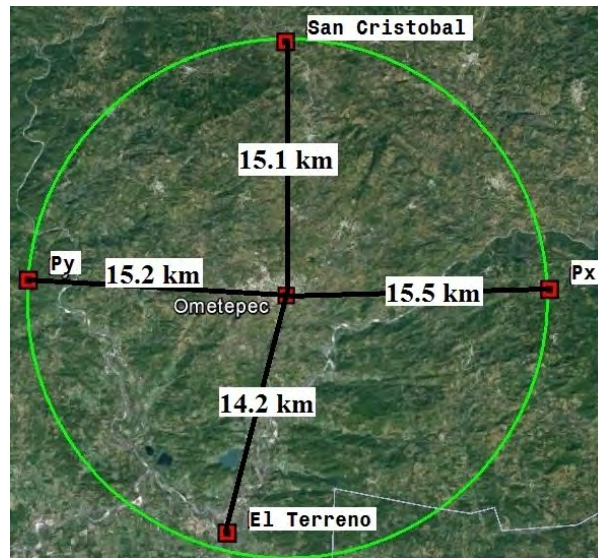


Figura 6.18 Ubicación de los puntos de interpolación para el modelo 1.

Se obtuvieron los EPU para los cuatro puntos en estudio, considerando un $T_r=475$ años (tasa de excedencia de $2.107e-3$) y parámetros definidos en las tablas 6.9 y 6.10. Los resultados de los EPU para los cuatro puntos estudiados se presentan en la tabla 6.11 para las dos ecuaciones de atenuación estudiadas; en la primera columna se presenta el periodo T en segundos y las columnas de la derecha las magnitudes de aceleración espectral (SA) en unidades de g.

Se procedió a aplicar el método de interpolación de Ponderación de Distancia Inversa (IDW) (Shepard, 1968) para los EPU encontrados. Inicialmente se calculó el factor de peso para cada punto mostrado en la tabla 6.12 para $p=3$. Los factores W_i de peso no resultan tan pequeños a comparación del resto de los modelos, debido a que los puntos de interpolación se encuentran más cercanos.

6.3. INTERPOLACIÓN IDW

Caso No.	Sitio	Siglas	Latitud °	Longitud °	Dist. (km)
13	San Cristobal	SCr	16.8213	-98.4033	15.13
14	El Terreno	ET	16.5618	-98.4397	14.24
15	Px	Px	16.6863	-98.2601	15.49
16	Py	Py	16.6958	-98.5475	15.20

Tabla 6.9 Ubicación de los cuatro puntos donde se obtendrán los EPU en la región.

Caso No.	13	14	15	16
MODELO	SCr-200km	ET-200km	Px-200km	Py-200km
RADIO DE INFLUENCIA	200 km			
AMPLIFICACIÓN DE SUELO	No considerada			
Vs	760 m/s			
FUENTES FALLA	OAX-CI, OAX-CII, OAX-O, OM, SM, GC	OAX-CI, OAX-CII, OAX-O, OM, SM, GC	OAX-CI, OAX-CII, OAX-O, OM, SM	OAX-CI, OAX-CII, OAX-O, OM, SM, GC
FUENTES ÁREA	IN1A, IN1B, IN2A, IN2B, SUB2, SUB3, NAM			
EC. ATENUACIÓN 1	Atkinson-Boore (2003) Worldwide Interface/Intraslab USGS 2002			
EC. ATENUACIÓN 2	Youngs (1997) Interface/Intraslab Rock USGS 2002			

Tabla 6.10 Modelos para obtener EPU en cuatro puntos de la región

RECURRENCIA: 10 %EN 50 años, Tr=475 años								
-	SA(g) : Youngs <i>et al.</i> (1997)				SA(g) : Atkinson y Boore (2003)			
T (s)	SCr	ET	Px	Py	SCr	ET	Px	Py
0	1.040	1.091	1.089	1.079	0.529	0.486	0.536	0.500
0.05	1.659	1.721	1.714	1.704	0.811	0.749	0.827	0.765
0.1	2.002	2.103	2.088	2.078	1.000	0.923	1.023	0.941
0.15	2.089	2.174	2.184	2.145	1.103	1.025	1.132	1.040
0.2	2.163	2.238	2.265	2.206	1.182	1.096	1.211	1.116
0.3	1.871	1.900	1.946	1.883	1.175	1.107	1.216	1.114
0.4	1.662	1.673	1.722	1.664	1.183	1.127	1.235	1.127
0.5	1.520	1.523	1.570	1.514	0.992	0.942	1.025	0.942
0.75	0.994	1.003	1.040	0.994	0.716	0.676	0.738	0.678
1	0.708	0.714	0.740	0.706	0.569	0.537	0.584	0.538
1.5	0.441	0.444	0.462	0.437	0.343	0.325	0.351	0.326
2	0.309	0.310	0.323	0.305	0.240	0.228	0.245	0.229
2.5	0.212	0.213	0.224	0.209	0.178	0.169	0.181	0.170
3	0.160	0.159	0.167	0.157	0.145	0.138	0.146	0.137
4	0.120	0.120	0.126	0.118	0.107	0.102	0.109	0.102

Tabla 6.11 EPU para cada sitio utilizando Y97 y AYB03.

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE PELIGRO SÍSMICO

Caso No.	Nombre	Latitud°	Longitud°	Dist. (km)	Wi	Wi/ $\sum Wi$
-	OM	16.6855	-98.4054	WGS-84		
13	SCr	16.8213	-98.4033	15.13	2.8890E-04	0.24293
14	ET	16.5618	-98.4397	14.24	3.4635E-04	0.29123
15	Px	16.6863	-98.2601	15.49	2.6903E-04	0.22622
16	Py	16.6958	-98.5475	15.20	2.8497E-04	0.23962
				Suma	0.001189247	1

Tabla 6.12 Pesos asignados a cada punto con $p=3$

Para la interpolación de EPU se realizaron diferentes operaciones variando el factor de potencia p , desde un valor mínimo de 2 a un valor máximo de 9. Las variaciones se muestran en la tabla 6.13 para valores de p de 2 a 5 y la tabla 6.14 para valores de p de 6 a 9, para la relación de atenuación de Y97. En las tablas se presentan las diferencias en porcentaje ($\Delta \%$) entre el EPU calculado para Ometepec y el EPU interpolado con diferentes valores de p

T	EPU calculado	2		3		3.5		4		5	
s	SA(g)	EPU Int	$\Delta \%$	EPU Int	$\Delta \%$	EPU Int	$\Delta \%$	EPU Int	$\Delta \%$	EPU Int	$\Delta \%$
0	1.074	1.075	-0.09 %	1.075	-0.11 %	1.075	-0.12 %	1.075	-0.13 %	1.075	-0.15 %
0.05	1.708	1.700	0.82 %	1.700	0.79 %	1.700	0.78 %	1.700	0.76 %	1.701	0.73 %
0.1	2.106	2.069	3.72 %	2.069	3.67 %	2.069	3.65 %	2.070	3.62 %	2.070	3.57 %
0.15	2.190	2.148	4.13 %	2.149	4.11 %	2.149	4.09 %	2.149	4.08 %	2.149	4.05 %
0.2	2.254	2.218	3.58 %	2.218	3.58 %	2.218	3.57 %	2.218	3.56 %	2.219	3.55 %
0.3	1.920	1.899	2.05 %	1.899	2.07 %	1.899	2.08 %	1.899	2.09 %	1.899	2.11 %
0.4	1.689	1.680	0.94 %	1.679	0.97 %	1.679	0.99 %	1.679	1.00 %	1.679	1.03 %
0.5	1.529	1.531	-0.22 %	1.530	-0.18 %	1.530	-0.17 %	1.530	-0.15 %	1.530	-0.12 %
0.75	1.002	1.007	-0.51 %	1.007	-0.49 %	1.007	-0.47 %	1.007	-0.46 %	1.007	-0.44 %
1	0.714	0.717	-0.29 %	0.717	-0.27 %	0.716	-0.26 %	0.716	-0.26 %	0.716	-0.24 %
1.5	0.444	0.446	-0.22 %	0.446	-0.21 %	0.446	-0.20 %	0.446	-0.20 %	0.446	-0.19 %
2	0.310	0.312	-0.15 %	0.312	-0.14 %	0.312	-0.14 %	0.312	-0.14 %	0.311	-0.13 %
2.5	0.214	0.215	-0.05 %	0.214	-0.05 %	0.214	-0.04 %	0.214	-0.04 %	0.214	-0.04 %
3	0.159	0.161	-0.12 %	0.161	-0.12 %	0.161	-0.12 %	0.161	-0.11 %	0.161	-0.11 %
4	0.121	0.121	0.00 %	0.121	0.00 %	0.121	0.00 %	0.121	0.01 %	0.121	0.01 %

Tabla 6.13 Interpolación del EPU para Ometepec con cuatro puntos, para valores de p de 2 a 5, para la relación de atenuación de Youngs *et al.* (1997).

- Para este modelo, con distancias de 15 km a Ometepec, se ha encontrado que valores mayores o iguales a $p=5$, especialmente el valor de $p=9$ tienden a ajustar mejor la interpolación, obteniéndose menor porcentaje de error en comparación a valores de p de 2 a 4 y de 6 a 8.

6.3. INTERPOLACIÓN IDW

T	EPU calculado	6		7		8		9	
s	SA(g)	EPU Int	Δ %	EPU Int	Δ %	EPU Int	Δ %	EPU Int	Δ %
0	1.074	1.076	-0.18 %	1.076	-0.20 %	1.076	-0.23 %	1.076	-0.26 %
0.05	1.708	1.701	0.70 %	1.701	0.66 %	1.702	0.63 %	1.702	0.59 %
0.1	2.106	2.071	3.51 %	2.071	3.46 %	2.072	3.40 %	2.072	3.33 %
0.15	2.190	2.149	4.02 %	2.150	3.99 %	2.150	3.95 %	2.150	3.91 %
0.2	2.254	2.219	3.53 %	2.219	3.51 %	2.219	3.49 %	2.219	3.46 %
0.3	1.920	1.899	2.13 %	1.898	2.15 %	1.898	2.16 %	1.898	2.18 %
0.4	1.689	1.678	1.06 %	1.678	1.09 %	1.678	1.12 %	1.678	1.15 %
0.5	1.529	1.529	-0.08 %	1.529	-0.05 %	1.529	-0.02 %	1.529	0.01 %
0.75	1.002	1.006	-0.42 %	1.006	-0.40 %	1.006	-0.38 %	1.006	-0.36 %
1	0.714	0.716	-0.22 %	0.716	-0.21 %	0.716	-0.19 %	0.716	-0.18 %
1.5	0.444	0.446	-0.18 %	0.445	-0.17 %	0.445	-0.16 %	0.445	-0.15 %
2	0.310	0.311	-0.12 %	0.311	-0.11 %	0.311	-0.10 %	0.311	-0.09 %
2.5	0.214	0.214	-0.03 %	0.214	-0.02 %	0.214	-0.02 %	0.214	-0.01 %
3	0.159	0.160	-0.10 %	0.160	-0.10 %	0.160	-0.09 %	0.160	-0.09 %
4	0.121	0.121	0.01 %	0.121	0.02 %	0.121	0.02 %	0.121	0.02 %

Tabla 6.14 Interpolación del EPU para Ometepec con cuatro puntos, para valores de p de 6 a 9, para la relación de atenuación de Youngs *et al.* (1997).

- Para $p=9$ el máximo error fue de 3.91 % ($T=0.15$ seg), los mayores porcentajes de error se concentraron en periodos $T < 0.5$ s, obteniéndose sub-estimaciones del orden del 4 %, error que según este modelo de interpolación se encuentra dentro los límites aceptables.
- El error máximo para un $p=2$ es de 4.13 % que cumple con las tolerancias para este tipo de modelos de interpolación, y puede corregirse fácilmente incrementando el número de puntos de interpolación.

En la figura 6.19 se muestran los EPU interpolados para diferentes valores de p , en un rango de periodos de 0 a 0.4 s, el EPU calculado queda por encima del espectro interpolado para la mejor aproximación de $p=9$. Sin embargo, los valores de p que van de 2 a 8 no presentan diferencias sustanciales con el ajuste de $p=9$, lo que indica que para distancias menores o iguales a 15 km de Ometepec, no se precisa buscar un ajuste exacto del valor de p , incluso se puede trabajar con un mínimo de $p=2$, permitiendo fijar una variable más en el proceso de interpolación que de por sí involucra bastantes variables.

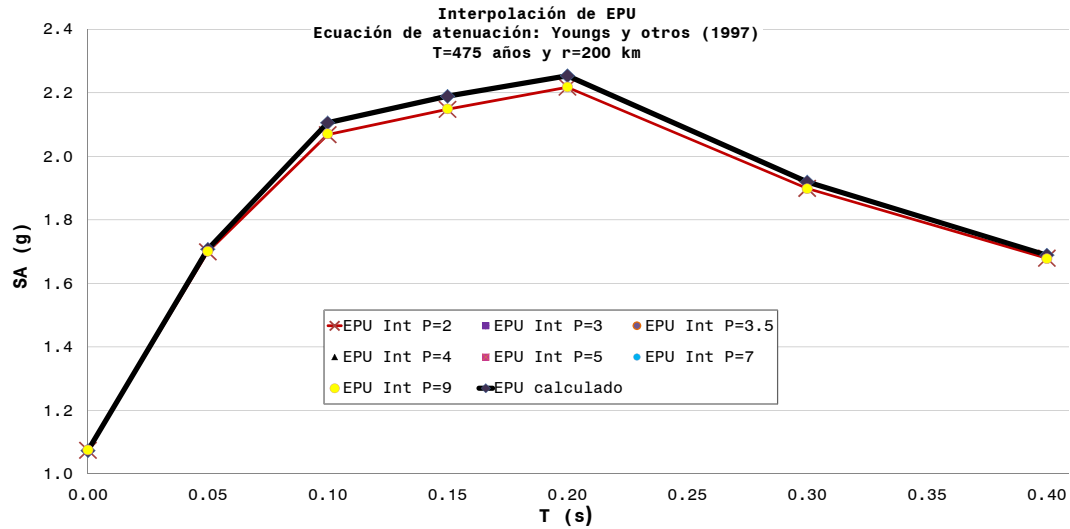


Figura 6.19 EPU interpolados para diferentes valores de p en comparación con el EPU calculado, para periodos menores a 0.4 s con Y97.

En la figura 6.20 se comparan los EPU interpolados para valores de p entre 4 y 9, con el EPU calculado. Se observa que los EPU interpolados quedan muy cercanos, con una ligera sub-estimación del espectro calculado en periodos menores a 0.5 s.

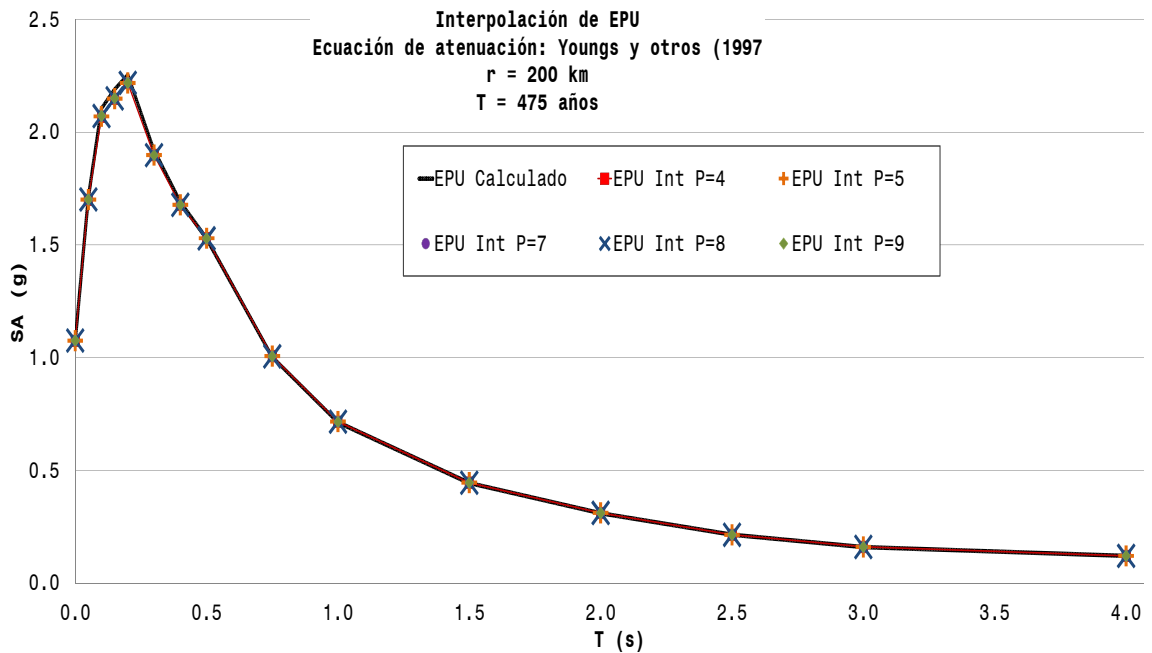


Figura 6.20 EPU calculado e interpolaciones con $4 \leq p \leq 9$, para Y97.

Para los EPU calculados con Atkinson y Boore (2003), las variaciones de p se presentan en la tabla 6.15 para valores de p de 2 a 4 y la tabla 6.16 para valores de p de 5 a 9. De acuerdo

6.3. INTERPOLACIÓN IDW

a los resultados se observó que:

- Se encontró que valores de p entre 2 y 3 tienden a ajustar mejor la interpolación, obteniéndose menor error en comparación con valores de p entre 4 y 9.
- Los errores llegan a ser de hasta 5.6 % ($T=0.4\text{seg}$) incluso con los ajustes para $p=2$, diferencias más notorias se encuentran en periodos entre 0.3seg y 1.5seg, obteniéndose sub-estimaciones del orden del 5 %.
- El máximo error para el caso extremo $p=9$ es de 6.35 % , si bien es mayor que la tolerancias para este tipo de modelos de interpolación, no se encuentra excesivamente alejado del valor calculado de aceleración, esto puede corregirse incrementando el número de puntos de interpolación.
- En este modelo no puede definirse un único valor de p adecuado, ya que los errores son bastante cercanos en todos los casos y puede trabajarse con buenos ajustes para $p=2$, evitándose variar este parámetro en la metodología.

T	EPU calculado	2		3		3.5		4	
s	SA(g)	EPU Int	Δ %	EPU Int	Δ %	EPU Int	Δ %	EPU Int	Δ %
0	0.508	0.512	-0.39 %	0.511	-0.33 %	0.511	-0.30 %	0.511	-0.27 %
0.05	0.787	0.787	0.06 %	0.786	0.14 %	0.785	0.18 %	0.785	0.22 %
0.1	0.972	0.970	0.17 %	0.969	0.28 %	0.968	0.33 %	0.968	0.38 %
0.15	1.086	1.073	1.31 %	1.072	1.42 %	1.071	1.47 %	1.071	1.53 %
0.2	1.169	1.149	1.98 %	1.148	2.10 %	1.147	2.16 %	1.146	2.22 %
0.3	1.189	1.151	3.84 %	1.150	3.94 %	1.149	4.00 %	1.149	4.05 %
0.4	1.222	1.166	5.64 %	1.165	5.74 %	1.164	5.79 %	1.164	5.84 %
0.5	1.020	0.974	4.57 %	0.973	4.65 %	0.973	4.69 %	0.972	4.73 %
0.75	0.742	0.701	4.17 %	0.700	4.23 %	0.700	4.26 %	0.699	4.29 %
1	0.595	0.556	3.94 %	0.555	3.98 %	0.555	4.01 %	0.555	4.03 %
1.5	0.360	0.336	2.42 %	0.336	2.45 %	0.336	2.46 %	0.335	2.47 %
2	0.254	0.235	1.85 %	0.235	1.87 %	0.235	1.88 %	0.235	1.89 %
2.5	0.180	0.174	0.58 %	0.174	0.59 %	0.174	0.60 %	0.174	0.60 %
3	0.141	0.141	0.00 %	0.141	0.01 %	0.141	0.02 %	0.141	0.02 %
4	0.107	0.105	0.19 %	0.105	0.20 %	0.105	0.20 %	0.105	0.20 %

Tabla 6.15 Interpolación del EPU para Ometepe con cuatro puntos, para valores de p de 2 a 4, para la relación de atenuación de Atkinson y Boore (2003).

T	EPU calculado	5		6		7		8		9	
s	SA(g)	EPU Int	Δ %	EPU Int	Δ %	EPU Int	Δ %	EPU Int	Δ %	EPU Int	Δ %
0	0.508	0.510	-0.22 %	0.509	-0.16 %	0.509	-0.10 %	0.508	-0.04 %	0.508	0.02 %
0.05	0.787	0.784	0.31 %	0.783	0.40 %	0.782	0.49 %	0.781	0.58 %	0.781	0.67 %
0.1	0.972	0.967	0.49 %	0.966	0.60 %	0.964	0.71 %	0.963	0.83 %	0.962	0.94 %
0.15	1.086	1.069	1.64 %	1.068	1.76 %	1.067	1.87 %	1.066	1.99 %	1.065	2.11 %
0.2	1.169	1.145	2.35 %	1.144	2.47 %	1.143	2.60 %	1.141	2.73 %	1.140	2.86 %
0.3	1.189	1.148	4.16 %	1.147	4.27 %	1.145	4.38 %	1.144	4.49 %	1.143	4.60 %
0.4	1.222	1.163	5.94 %	1.162	6.04 %	1.161	6.14 %	1.160	6.24 %	1.159	6.35 %
0.5	1.020	0.971	4.81 %	0.971	4.89 %	0.970	4.97 %	0.969	5.06 %	0.968	5.14 %
0.75	0.742	0.699	4.35 %	0.698	4.41 %	0.697	4.48 %	0.697	4.54 %	0.696	4.60 %
1	0.595	0.555	4.08 %	0.554	4.12 %	0.554	4.17 %	0.553	4.22 %	0.553	4.26 %
1.5	0.360	0.335	2.50 %	0.335	2.53 %	0.335	2.55 %	0.334	2.58 %	0.334	2.61 %
2	0.254	0.235	1.91 %	0.235	1.92 %	0.234	1.94 %	0.234	1.96 %	0.234	1.98 %
2.5	0.180	0.174	0.61 %	0.174	0.63 %	0.174	0.64 %	0.174	0.65 %	0.174	0.66 %
3	0.141	0.141	0.03 %	0.141	0.04 %	0.141	0.05 %	0.141	0.06 %	0.141	0.07 %
4	0.107	0.105	0.21 %	0.105	0.21 %	0.105	0.22 %	0.105	0.23 %	0.104	0.23 %

Tabla 6.16 Interpolación del EPU para Ometepec con cuatro puntos, para valores de p de 5 a 9, para la relación de atenuación de Atkinson y Boore (2003).

En la figura 6.21 se presentan los EPU interpolados para diferentes valores de p , en un intervalo de periodos de 0 a 0.4 s, se aprecia que el EPU calculado queda por encima del espectro interpolado para $p=2$.

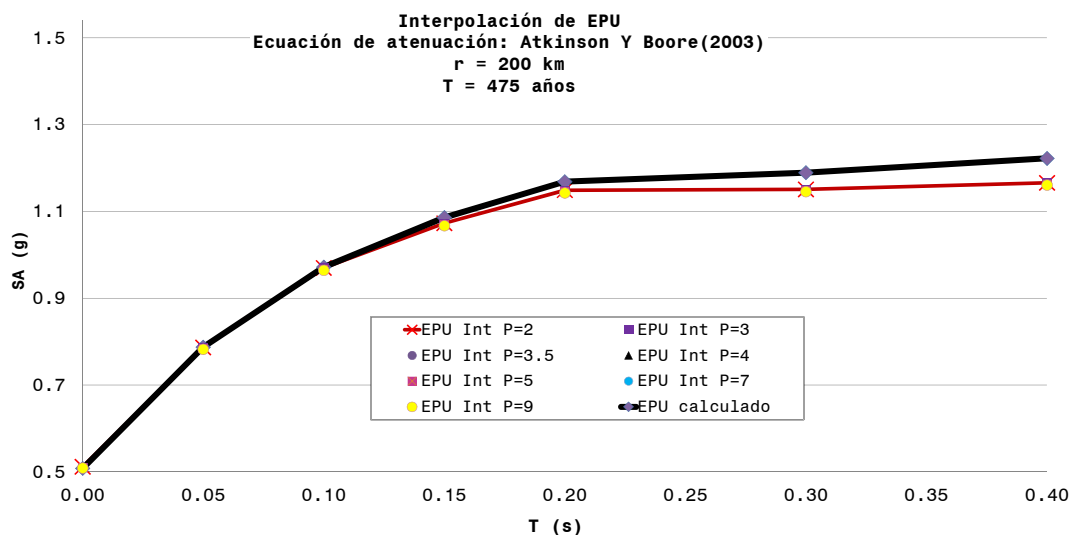


Figura 6.21 EPU interpolados para diferentes valores de p en comparación con el EPU calculado, para periodos menores a 0.4 s. con AYB03.

En la figura 6.22 se comparan los EPU interpolados para valores de p entre 2 y 5, con el EPU calculado, en todo el intervalo de periodos. Se observa que los EPU interpolados quedan

6.3. INTERPOLACIÓN IDW

con una ligera sub-estimación del EPU calculado en periodos menores a 2 s.

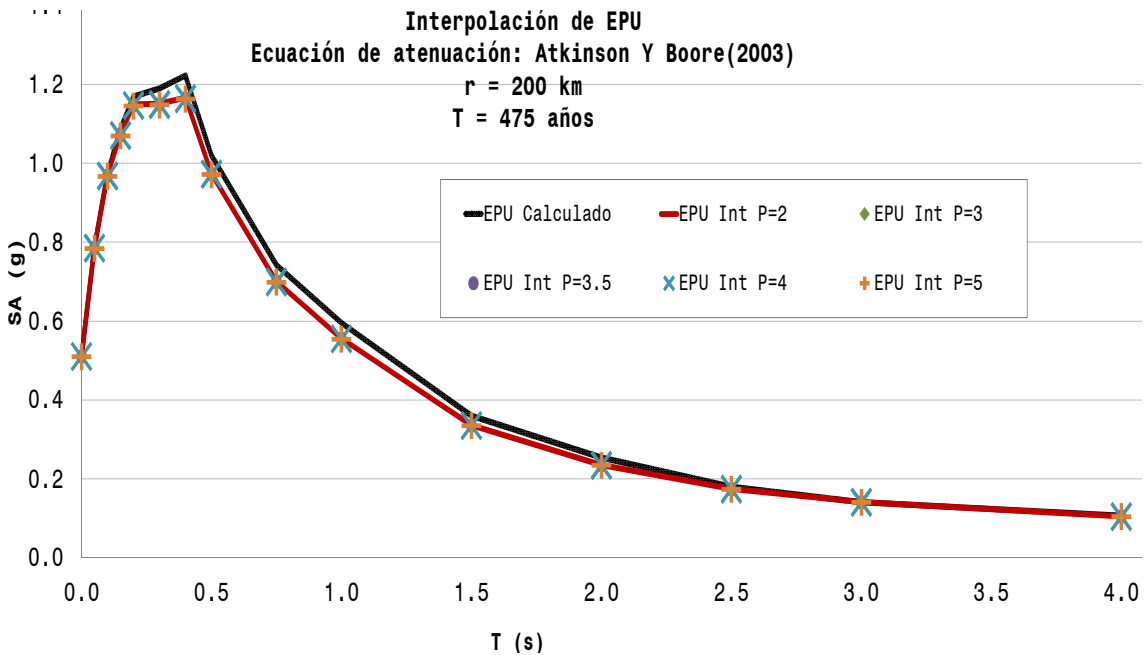


Figura 6.22 EPU calculado e interpolaciones con $2 \leq p \leq 5$, para AYB03.

6.3.2. Modelo 2: Puntos de interpolación a distancias menores de 30 km

Se realizaron cinco modelos de peligro sísmico obteniendo EPU para ciudades con distancias $\leq 30 \text{ km}$ a la redonda de Ometepe; luego se procedió a interpolar los EPU de las cinco ciudades obteniéndose un EPU interpolado para Ometepe, comparándolo con el EPU calculado para las coordenadas de Ometepe. La figura 6.23 muestra la ubicación de los puntos de interpolación respecto al sitio de Ometepe. En este modelo, se estudió un radio de influencia de fallas de 320 km tomados desde cada punto de estudio, para poder validar el método con diferentes escenarios sísmicos. Los sitios cercanos a Ometepe para obtener los EPU se describen en la tabla 6.17 y los parámetros utilizados para los modelos se presentan en la tabla 6.18.

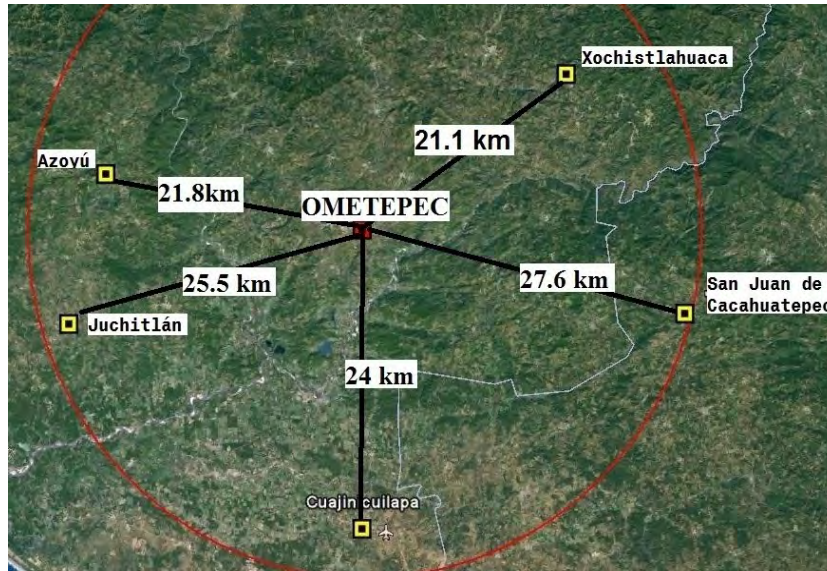


Figura 6.23 Ubicación de los puntos de interpolación para el modelo 2.

Caso No.	Sitio	Siglas	Latitud °	Longitud °	Dist. (km)
-	Ometepec	OM	16.68545	-98.4054	WGS-84
4	Azoyú	AZ	16.73253	-98.6034	21.75
5	Juchitán	JU	16.62545	-98.6364	25.52
6	San Juan Cacahuatepec	SJC	16.61597	-98.1566	27.64
7	Xochistlahuaca	XO	16.79185	-98.2421	21.06
8	Cuajinicuilapa	CUA	16.46983	-98.4138	24.02

Tabla 6.17 Ubicación de los 5 puntos donde se obtendrán los EPU en la región.

Caso No.	4	5	6	7	8
MODELO	AZ-320km	JU -320km	SJC -320km	XO -320km	CUA -320km
RADIO DE INFLUENCIA	320 km				
AMPLIFICACIÓN DE SUELO	No considerada				
Vs	760 m/s				
FUENTES FALLA	OX-E, AX-CI, OX-CII, OX-O, OM, AC-SM, GC, PE		OX-E, AX-CI, OX-CII, OX-O, OM, AC-SM, GC		
FUENTES ÁREA	SUB2, SUB3 IN1A, IN2A, IN1B, IN2B, NAM				
EC. ATENUACIÓN 1	Atkinson-Boore (2003) Worldwide Interface/Intraslab USGS 2002				
EC. ATENUACIÓN 2	Youngs (1997) Interface/Intraslab Rock USGS 2002				

Tabla 6.18 Modelos para obtner EPU en 5 puntos de la región.

6.3. INTERPOLACIÓN IDW

En la tabla 6.19 se muestran los resultados de los EPU para los cinco puntos, considerando $T_r=475$ años y los parámetros mostrados en las tablas 6.17 y 6.18, para las ecuaciones de Y97 y AYB03.

RECURRENCIA: 10 % EN 50 años, $T_r=475$ años										
T (s)	SA(g) : Youngs <i>et al.</i> (1997)					SA(g) : Atkinson y Boore (2003)				
	AZ	JU	SJC	XO	CUA	AZ	JU	SJC	XO	CUA
0.00	1.078	1.091	1.129	1.056	1.099	0.503	0.477	0.546	0.544	0.474
0.05	1.703	1.723	1.777	1.678	1.728	0.770	0.731	0.844	0.840	0.733
0.1	2.076	2.109	2.180	2.027	2.129	0.946	0.901	1.050	1.036	0.904
0.15	2.144	2.167	2.284	2.128	2.201	1.043	0.994	1.157	1.146	1.006
0.2	2.204	2.223	2.373	2.210	2.267	1.120	1.066	1.244	1.224	1.077
0.3	1.881	1.886	2.031	1.912	1.920	1.115	1.071	1.257	1.223	1.095
0.4	1.665	1.662	1.795	1.696	1.685	1.126	1.085	1.284	1.236	1.122
0.5	1.515	1.509	1.632	1.552	1.530	0.940	0.908	1.057	1.032	0.935
0.75	0.994	0.990	1.086	1.024	1.014	0.676	0.651	0.758	0.743	0.669
1.0	0.706	0.703	0.773	0.730	0.720	0.536	0.517	0.600	0.590	0.532
2.0	0.304	0.303	0.339	0.319	0.314	0.229	0.221	0.252	0.249	0.226
3.0	0.156	0.155	0.175	0.166	0.161	0.137	0.134	0.148	0.149	0.136
4.0	0.117	0.117	0.133	0.124	0.122	0.102	0.100	0.111	0.110	0.102

Tabla 6.19 EPU para cada sitio con Y97 y AYB03

La interpolación de los EPU, se realizó con el Método de Ponderación de distancia inversa (IDW) Shepard (1968), descrito en la sección 2.4.1. Se calibró el factor de potencia p según los resultados (ecuación 2.8). La magnitud del peso asignado a cada punto, varía de 1 a un valor cercano a 0, a medida que la distancia de interpolación aumenta. En la tabla 6.20 para un valor de $p=5$, se presentan los pesos calculados para cada distancia, y el factor de peso entre sumatoria de pesos (columna 7).

Caso No.	Nombre	Latitud	Longitud	Dist (km)	Wi	Wi/ ΣW_i
	OM			WGS-84		
4	AZ	16.733	-98.603	21.75	2.05E-07	0.283
5	JU	16.625	-98.636	25.52	9.23E-08	0.127
6	SJC	16.616	-98.157	27.64	6.2E-08	0.085
7	XO	16.792	-98.242	21.06	2.42E-07	0.333
8	CUA	16.470	-98.414	24.02	1.25E-07	0.172
				Suma	7.26E-07	1

Tabla 6.20 Pesos asignados a cada punto con $p=5$.

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE PELIGRO SÍSMICO

Las tablas 6.21 y 6.22 muestran las diferencias en porcentaje ($\Delta \%$) entre el EPU calculado para Ometepec y el EPU interpolado variando el parámetro p de 2 a 9, respecto al EPU obtenido Y97.

T	EPU Calculado	p=2		p=3		p=3.5		p=4	
(s)	SA(g)	EPU Int	$\Delta \%$	EPU Int	$\Delta \%$	EPU Int	$\Delta \%$	EPU Int	$\Delta \%$
0	1.076	1.086	-1.0 %	1.084	-0.8 %	1.083	-0.7 %	1.082	-0.6 %
0.05	1.712	1.716	-0.4 %	1.713	-0.1 %	1.712	0.0 %	1.710	0.1 %
0.1	2.110	2.095	1.5 %	2.090	2.0 %	2.088	2.21 %	2.086	2.42 %
0.15	2.196	2.175	2.1 %	2.171	2.5 %	2.169	2.69 %	2.167	2.89 %
0.2	2.262	2.246	1.6 %	2.241	2.0 %	2.239	2.2 %	2.237	2.4 %
0.3	1.928	1.919	0.8 %	1.916	1.1 %	1.915	1.3 %	1.914	1.4 %
0.4	1.695	1.695	0.0 %	1.693	0.2 %	1.692	0.3 %	1.691	0.4 %
0.5	1.536	1.543	-0.7 %	1.541	-0.5 %	1.541	-0.5 %	1.540	-0.4 %
0.75	1.008	1.018	-1.1 %	1.017	-0.9 %	1.016	-0.9 %	1.016	-0.8 %
1	0.717	0.724	-0.7 %	0.723	-0.6 %	0.723	-0.6 %	0.722	-0.5 %
2	0.311	0.315	-0.3 %	0.314	-0.3 %	0.314	-0.3 %	0.314	-0.3 %
3	0.161	0.162	-0.1 %	0.162	-0.1 %	0.162	-0.1 %	0.162	-0.1 %
4	0.121	0.122	-0.1 %	0.122	-0.1 %	0.122	-0.1 %	0.122	-0.1 %

Tabla 6.21 Interpolación del EPU para Ometepec con 5 puntos, para valores de p de 2 a 4, con la relación de atenuación de Youngs *et al.* (1997).

T	EPU Calculado	p=5		p=7		p=9	
(s)	SA(g)	EPU Int	$\Delta \%$	EPU Int	$\Delta \%$	EPU Int	$\Delta \%$
0	1.076	1.080	-0.4 %	1.077	0.0 %	1.074	0.2 %
0.05	1.712	1.708	0.4 %	1.704	0.8 %	1.700	1.2 %
0.1	2.110	2.082	2.8 %	2.075	3.6 %	2.068	4.2 %
0.15	2.196	2.163	3.3 %	2.157	3.9 %	2.151	4.4 %
0.2	2.262	2.234	2.8 %	2.228	3.4 %	2.223	3.9 %
0.3	1.928	1.912	1.6 %	1.908	2.0 %	1.906	2.2 %
0.4	1.695	1.689	0.6 %	1.687	0.8 %	1.686	1.0 %
0.5	1.536	1.539	-0.3 %	1.537	-0.1 %	1.537	-0.1 %
0.75	1.008	1.015	-0.7 %	1.014	-0.6 %	1.013	-0.5 %
1	0.717	0.722	-0.5 %	0.721	-0.4 %	0.720	-0.4 %
2	0.311	0.314	-0.2 %	0.313	-0.2 %	0.313	-0.2 %
3	0.161	0.162	-0.1 %	0.162	-0.1 %	0.162	-0.1 %
4	0.121	0.122	-0.1 %	0.122	-0.1 %	0.122	-0.1 %

Tabla 6.22 Interpolación del EPU para Ometepec con 5 puntos, para valores de p de 5 a 9, para la relación de atenuación de Youngs *et al.* (1997).

- Magnitudes de p entre 2 y 4 presentaron diferencias menores del 3 % en todos los casos.

6.3. INTERPOLACIÓN IDW

- Para magnitudes de p mayores a 5, las aproximaciones presentaron diferencias del orden del 4 %, y en todos los casos se tuvieron espectros sub-estimados para periodos menores a 0.5 s), sin embargo, y a pesar del incremento de las distancias de los puntos de interpolación, se obtuvieron buenos resultados.
- Encontrar el límite donde las aproximaciones empiezan a sub-estimarse es muy sensible, en este caso se considera que un valor adecuado de p debe ser menor que 5.

El propósito de este estudio no es refinar el parámetro p de ponderación, sino plantear una metodología que permita estimar EPU a partir de valores conocidos fijando valores de p que permitan obtener buenas aproximaciones, con errores menores al 6 % para todos los modelos.

En la figura 6.24 se muestran los EPU interpolados con diferentes valores de p , estudiando periodos de 0 a 0.4 s. Puede observarse que las estimaciones del EPU con valores p entre 2 a 4 son muy cercanas al EPU calculado (línea negra) y que el EPU interpolado con $p=9$, presenta una sub-estimación mayor.

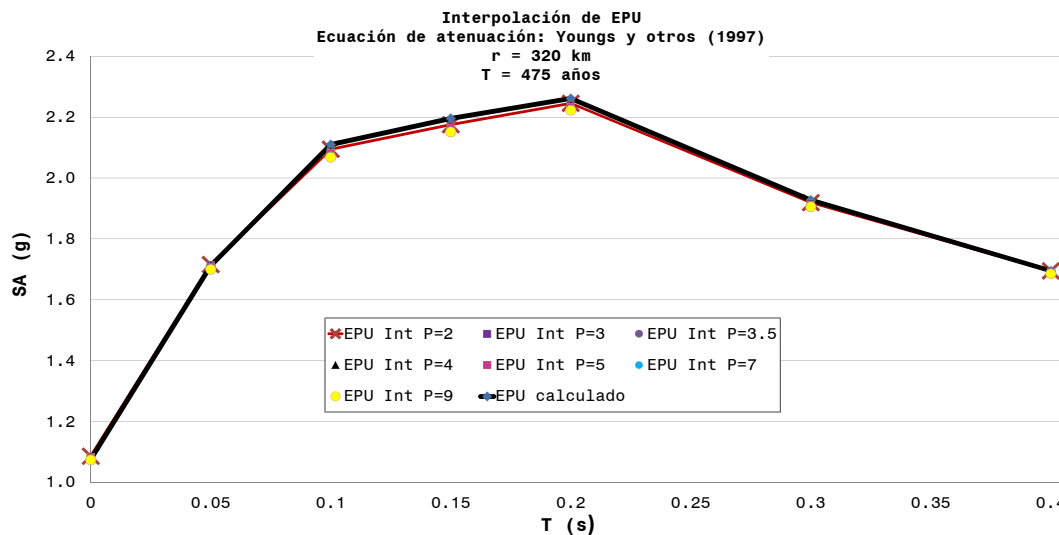


Figura 6.24 EPU interpolados para diferentes valores de p en comparación con EPU calculado para Ometepec, para periodos menores a 0.4 s con Y97.

En la figura 6.25 se presentan los EPU para $T_r=475$ años, comparando el EPU calculado para las coordenadas de Ometepec (línea negra) con los EPU interpolados, para valores de p con diferencias menores al 3 %, interpolando con 5 puntos cuyas distancias son menores a 30 km.

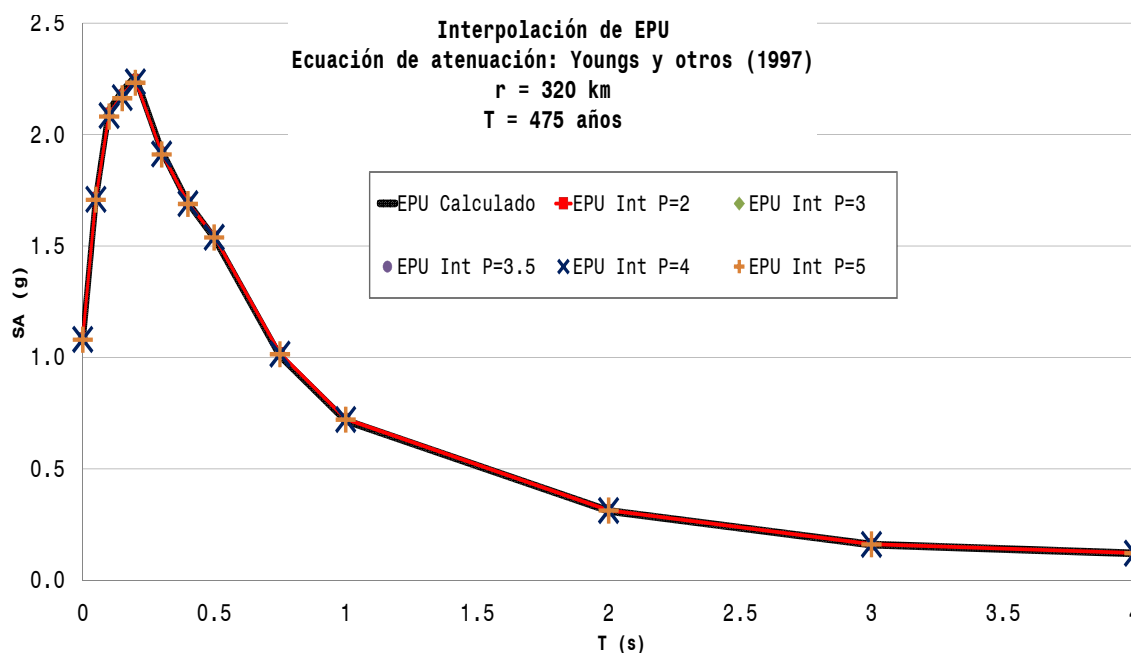


Figura 6.25 EPU calculado e interpolaciones con $2 \leq p \leq 5$, para Y97.

Las tablas 6.23 y 6.24 muestran las diferencias que se obtienen entre los EPU interpolados variando el parámetro p de 2 a 9, con el EPU calculado para Ometepec, utilizando la relación de atenuación de Atkinson y Boore (2003).

T	EPU Calculado	p=2		p=3		p=3.5		p=4	
s	SA(g)	EPU Int	Δ %	EPU Int	Δ %	EPU Int	Δ %	EPU Int	Δ %
0	0.515	0.510	0.539 %	0.510	0.470 %	0.511	0.430 %	0.511	0.385 %
0.05	0.792	0.784	0.755 %	0.785	0.657 %	0.786	0.599 %	0.787	0.534 %
0.1	0.973	0.968	0.533 %	0.969	0.437 %	0.970	0.376 %	0.970	0.307 %
0.15	1.080	1.070	0.970 %	1.071	0.859 %	1.072	0.789 %	1.072	0.710 %
0.2	1.155	1.147	0.839 %	1.148	0.738 %	1.148	0.672 %	1.149	0.597 %
0.3	1.155	1.151	0.396 %	1.152	0.357 %	1.152	0.321 %	1.153	0.276 %
0.4	1.171	1.169	0.209 %	1.169	0.212 %	1.169	0.198 %	1.169	0.173 %
0.5	0.977	0.974	0.377 %	0.974	0.349 %	0.974	0.322 %	0.975	0.288 %
0.75	0.704	0.699	0.465 %	0.699	0.432 %	0.700	0.407 %	0.700	0.376 %
1	0.558	0.555	0.324 %	0.555	0.294 %	0.555	0.273 %	0.556	0.247 %
2	0.237	0.236	0.120 %	0.236	0.107 %	0.236	0.098 %	0.236	0.087 %
3	0.142	0.141	0.100 %	0.141	0.088 %	0.141	0.081 %	0.141	0.073 %
4	0.105	0.105	0.028 %	0.105	0.023 %	0.105	0.019 %	0.105	0.015 %

Tabla 6.23 Interpolación del EPU para Ometepec con 5 puntos, para valores de p de 2 a 4, para la relación de atenuación de Atkinson y Boore (2003).

6.3. INTERPOLACIÓN IDW

T	EPU Calculado	p=5		p=7		p=9	
(s)	SA(g)	EPU Int	Δ %	EPU Int	Δ %	EPU Int	Δ %
0	0.515	0.512	0.288 %	0.514	0.068 %	0.517	-0.166 %
0.05	0.792	0.788	0.390 %	0.791	0.061 %	0.795	-0.294 %
0.1	0.973	0.972	0.149 %	0.976	-0.227 %	0.980	-0.643 %
0.15	1.080	1.074	0.533 %	1.078	0.115 %	1.083	-0.344 %
0.2	1.155	1.151	0.423 %	1.155	0.005 %	1.160	-0.461 %
0.3	1.155	1.154	0.160 %	1.157	-0.151 %	1.161	-0.526 %
0.4	1.171	1.170	0.096 %	1.172	-0.145 %	1.175	-0.459 %
0.5	0.977	0.975	0.199 %	0.978	-0.040 %	0.981	-0.331 %
0.75	0.704	0.701	0.300 %	0.703	0.105 %	0.705	-0.125 %
1	0.558	0.556	0.184 %	0.558	0.026 %	0.560	-0.157 %
2	0.237	0.236	0.061 %	0.237	-0.002 %	0.238	-0.075 %
3	0.142	0.142	0.055 %	0.142	0.014 %	0.142	-0.031 %
4	0.105	0.105	0.005 %	0.106	-0.020 %	0.106	-0.048 %

Tabla 6.24 Interpolación del EPU para Ometepec con 5 puntos, para valores de p de 5 a 9, para la relación de atenuación de Atkinson y Boore (2003).

- Para valores de p de 5 y 9 se tienen diferencias menores al 1 % en todos los casos, a pesar de que se tiene cierta sobre-estimación, los errores son mínimos y es posible trabajar con valores de p entre ese rango.
- Para valores de p entre 2 y 4, se obtuvieron errores más cercanos a 1 %, para periodos menores a 0.5 s, sin embargo entran dentro de las tolerancias esperadas.
- Entonces, utilizar un valor de p de 2 a 9 no afecta en la interpolación de los EPU en el caso de la relación de atenuación AYB03, utilizar un valor de $p=2$ es aceptable.

En la figura 6.26 se muestran los EPU interpolados con diferentes valores de p , estudiando solo los periodos de 0 a 0.4 s. Las estimaciones con valores p entre 5 y 9 son muy próximas al calculado (línea negra), sin embargo las diferencias para el resto de valores de p no son significativas y se tienen buenas interpolaciones. En la figura 6.27 se presentan los EPU para $T_r=475$ años, comparando el espectro calculado (línea negra) con los EPU interpolados con el método IDW para valores de p con diferencias menores al 1 %, interpolando con puntos cuyas distancias a Ometepec son menores a 30 km.

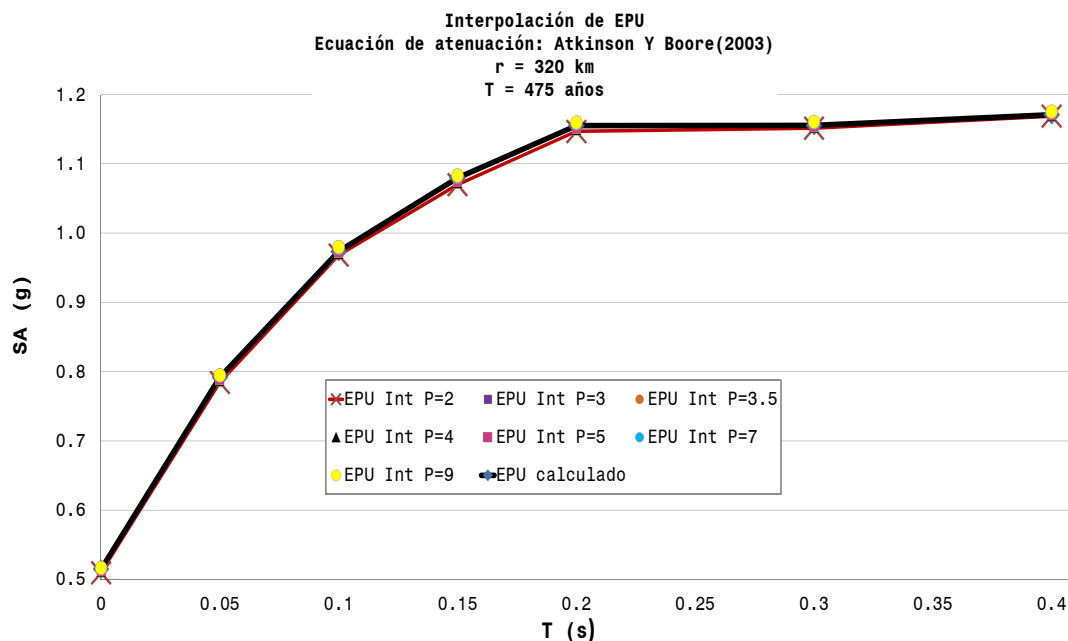


Figura 6.26 EPU interpolados para diferentes valores de p en comparación con EPU calculado para Ometepec, en un intervalo de periodos menores a 0.4 s, con AYW03.

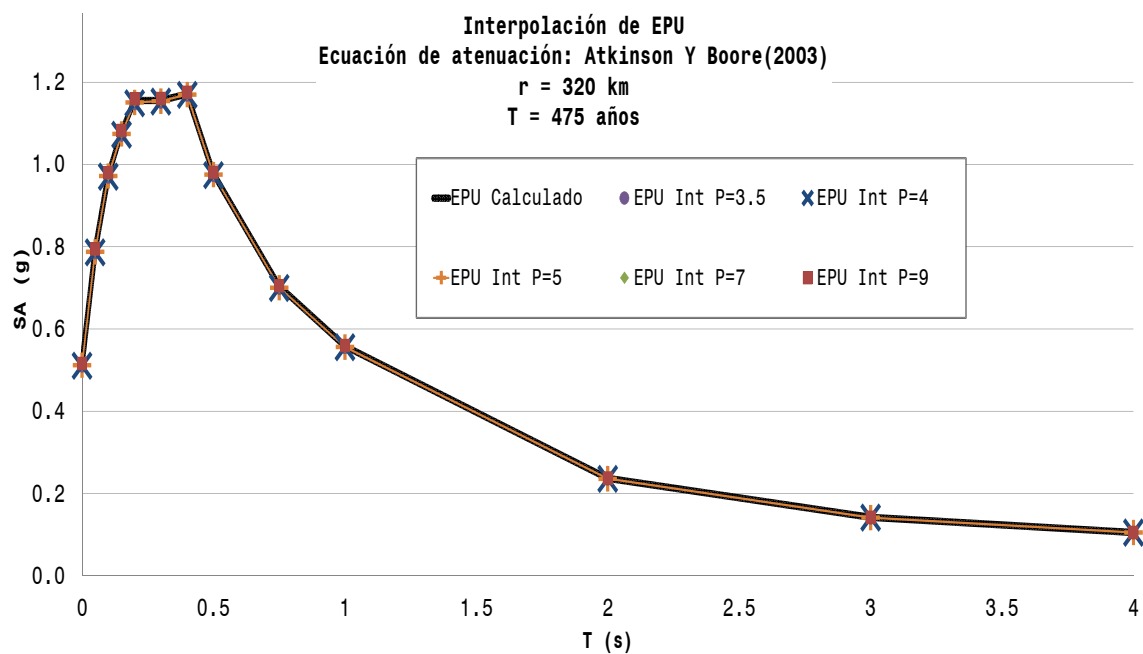


Figura 6.27 EPU calculado e interpolaciones con $5 \leq p \leq 9$, para AYW03.

6.3. INTERPOLACIÓN IDW

6.3.3. Modelo 3: Puntos de interpolación a distancias menores de 70 km

En este caso se incrementó la distancia para los puntos de interpolación sin sobrepasar los 70 km, el procedimiento utilizado fue el mismo que para el modelo 1, sin embargo, los resultados encontrados fueron diferentes. Se observó que debido al incremento de distancia de los puntos de interpolación, se obtuvo un EPU poco preciso, con una sobre-estimación de los resultados considerable.

Se estudió la influencia de fuentes sísmicas en un radio de 320 km desde cada punto estudiado. Se utilizaron las relaciones de atenuación de Youngs *et al.* (1997) y Atkinson y Boore (2003). En la figura 6.28 se observa la distribución de los puntos de interpolación, en la tabla 6.25 se describen las coordenadas y distancias a cada punto desde Ometepec y en la tabla 6.27 se presentan las aceleraciones espectrales (SA) en función de la gravedad de los EPU para cada punto, para las ecuaciones de atenuación de Y97 y AYB03, calculadas para un $T_r=475$ años (tasa de excedencia de $2.107E-3$), con los parámetros definidos en la tabla 6.26.



Figura 6.28 Ubicación de los puntos de interpolación para el modelo 3.

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE PELIGRO SÍSMICO

Caso No.	Sitio	Siglas	Latitud	Longitud	Dist km
9	Pinotepa de Don Luis	PDL	16.4271	-97.9766	54.04
10	Coicoyan de Las Flores	CLF	17.2713	-98.2741	66.69
11	Mesones Hidalgo	MH	16.9135	-97.9671	53.16
12	Copala	CO	16.6045	-98.9752	61.44

Tabla 6.25 Ubicación de los 4 puntos donde se obtendrán los EPU en la región

Caso No.	9	10	11	12
MODELO	PDL-320km	CLF -320km	MH -320km	CO -320km
RADIO DE INFLUENCIA	320 km			
AMPLIFICACION DE SUELO	No considerada			
Vs	760 m/s			
FUENTES FALLA	GC, OX-CI, OX-CII, OX-O, OX-OR, SM, OM	GC, OX-CI, OX-CII, OX-O, OX-OR, SM, OM		GC, OX-CI, OX-CII, OX-O, SM, OM, PE
FUENTES ÁREA	IN1A, IN1B, IN2A, IN2B, SUB2, SUB3, NAM	IN1A, IN1B, IN1C, IN2A, IN2B, IN2C, SUB2, SUB3, NAM		IN1A, IN1B, IN2A, IN2B, SUB2, SUB3, NAM
EC. ATENUACIÓN 1	Atkinson-Boore (2003) Worldwide Interface/Intraslab USGS 2002			
EC. ATENUACIÓN 2	Youngs (1997) Interface/Intraslab Rock USGS 2002			

Tabla 6.26 Modelos para obtener EPU en 4 puntos de la región

	RECURRENCIA: 10 %EN 50 años, Tr=475 años							
	SA(g) : Youngs (1997)				SA(g) : Atkinson y Boore (2003)			
T (s)	PDL	CLF	MH	CO	PDL	CLF	MH	CO
0	1.162	0.885	1.041	1.125	0.534	0.543	0.577	0.467
0.05	1.822	1.403	1.666	1.769	0.829	0.827	0.889	0.723
0.1	2.251	1.709	1.995	2.187	1.036	1.015	1.099	0.888
0.15	2.365	1.812	2.099	2.257	1.146	1.086	1.204	0.983
0.2	2.463	1.882	2.187	2.322	1.239	1.150	1.285	1.049
0.3	2.090	1.646	1.905	1.957	1.277	1.131	1.281	1.060
0.4	1.835	1.453	1.700	1.713	1.287	1.125	1.296	1.079
0.5	1.665	1.323	1.561	1.551	1.076	0.943	1.080	0.894
0.75	1.121	0.873	1.032	1.028	0.766	0.689	0.779	0.634
1	0.799	0.628	0.738	0.728	0.607	0.554	0.622	0.500
2	0.355	0.277	0.327	0.313	0.255	0.243	0.264	0.212
3	0.183	0.148	0.170	0.159	0.148	0.151	0.160	0.128
4	0.138	0.110	0.128	0.120	0.112	0.113	0.119	0.096

Tabla 6.27 EPU para cada sitio utilizando Y97 y AYB03.

6.3. INTERPOLACIÓN IDW

En la tabla 6.28 se presentan los factores de peso correspondientes al método de interpolación de Ponderación de Distancia Inversa (Shepard, 1968), para cada punto, utilizando un valor de $p=9$. Es interesante observar que en este modelo, los factores W_i de peso son muy pequeños, debido a que los puntos de interpolación se encuentran más alejados que en el primer y segundo modelo.

Caso No.	Nombre	Latitud	Longitud	Dist (km)	Wi	Wi/ Σ Wi
	OM	16.6855	-98.4054	WGS-84		
1	PDL	16.4271	-97.9766	54.04	2.54E-16	0.380822
2	CLF	17.2713	-98.2741	66.69	3.83E-17	0.05739
3	MH	16.9135	-97.9671	53.16	2.95E-16	0.441696
4	CO	16.6045	-98.9752	61.44	8.02E-17	0.120092
				SUMA	6.7E-16	

Tabla 6.28 Pesos asignados a cada punto con $p=5$

Los resultados de las variaciones del factor de potencia p se presentan en las tablas 6.29 para valores de p de 2 a 4 y la tabla 6.30 para valores de p de 5 a 9, utilizando la relación de atenuación Y97.

T s	EPU Calculado SA(g)	p=2		p=3		p=3.5		p=4	
		EPU Int	Δ %	EPU Int	Δ %	EPU Int	Δ %	EPU Int	Δ %
0	1.08	1.06	1.1 %	1.07	0.6 %	1.07	0.4 %	1.07	0.2 %
0.05	1.71	1.68	2.8 %	1.69	1.9 %	1.70	1.6 %	1.70	1.2 %
0.1	2.11	2.06	5.2 %	2.07	4.3 %	2.07	3.9 %	2.08	3.5 %
0.15	2.20	2.16	4.0 %	2.17	3.0 %	2.17	2.5 %	2.18	2.1 %
0.2	2.26	2.24	2.3 %	2.25	1.2 %	2.25	0.7 %	2.26	0.2 %
0.3	1.93	1.92	0.7 %	1.93	-0.2 %	1.93	-0.7 %	1.94	-1.1 %
0.4	1.70	1.69	0.0 %	1.70	-0.8 %	1.71	-1.3 %	1.71	-1.6 %
0.5	1.54	1.54	-0.8 %	1.55	-1.6 %	1.56	-2.0 %	1.56	-2.3 %
0.75	1.01	1.03	-1.9 %	1.03	-2.5 %	1.04	-2.8 %	1.04	-3.0 %
1	0.72	0.73	-1.6 %	0.74	-2.0 %	0.74	-2.2 %	0.74	-2.3 %
2	0.31	0.32	-1.1 %	0.32	-1.3 %	0.33	-1.4 %	0.33	-1.5 %
3	0.16	0.17	-0.6 %	0.17	-0.7 %	0.17	-0.8 %	0.17	-0.8 %
4	0.12	0.13	-0.5 %	0.13	-0.6 %	0.13	-0.6 %	0.13	-0.7 %

Tabla 6.29 Interpolación del EPU para Ometepe con cuatro puntos, para valores de p de 2 a 4 y la relación de atenuación de Youngs *et al.* (1997)

T s	EPU calculado SA(g)	p=5		p=7		p=8		p=9	
		EPU Int	Δ %	EPU Int	Δ %	EPU Int	Δ %	EPU Int	Δ %
0	1.08	1.08	-0.2 %	1.08	-0.8 %	1.09	-1.0 %	1.09	-1.2 %
0.05	1.71	1.71	0.6 %	1.72	-0.4 %	1.72	-0.8 %	1.72	-1.1 %
0.1	2.11	2.08	2.8 %	2.09	1.8 %	2.10	1.4 %	2.10	1.1 %
0.15	2.20	2.18	1.3 %	2.19	0.1 %	2.20	-0.3 %	2.20	-0.7 %
0.2	2.26	2.27	-0.6 %	2.28	-2.0 %	2.29	-2.5 %	2.29	-2.9 %
0.3	1.93	1.95	-1.8 %	1.96	-3.0 %	1.96	-3.5 %	1.97	-3.9 %
0.4	1.70	1.72	-2.3 %	1.73	-3.5 %	1.73	-4.0 %	1.74	-4.3 %
0.5	1.54	1.57	-3.0 %	1.58	-4.1 %	1.58	-4.6 %	1.59	-5.0 %
0.75	1.01	1.04	-3.5 %	1.05	-4.3 %	1.05	-4.6 %	1.06	-4.9 %
1	0.72	0.74	-2.7 %	0.75	-3.3 %	0.75	-3.5 %	0.75	-3.7 %
2	0.31	0.33	-1.7 %	0.33	-1.9 %	0.33	-2.1 %	0.33	-2.2 %
3	0.16	0.17	-0.9 %	0.17	-1.1 %	0.17	-1.1 %	0.17	-1.2 %
4	0.12	0.13	-0.7 %	0.13	-0.8 %	0.13	-0.9 %	0.13	-0.9 %

Tabla 6.30 Interpolación del EPU para Ometepec con cuatro puntos, para valores de p de 5 a 9, para la relación de atenuación de Youngs *et al.* (1997).

- Para este modelo, con cuatro puntos de interpolación con distancias ≤ 70 km respecto a Ometepec, se encontró que para valores de $p=2$ y $p=3$ subestiman las magnitudes de aceleración espectral (SA), mientras que para valores de p entre 3.5 y 9, se obtienen sobre-estimaciones de SA.
- Los errores llegan a ser de hasta -4.9 % para $p=9$ y 5.2 % para $p=2$. La mejor aproximación se obtiene con un valor de $p=4$, donde para periodos menores a 0.5 s, se observan las sub-estimaciones de SA de hasta 3.5 %.
- En todos los casos se tienen errores mayores o iguales (en valor absoluto) que 3.5 %, esto debido a la lejanía de los puntos.

En la figura 6.29 se presentan los EPU interpolados para diferentes valores de p , en un intervalo de periodos de 0 a 0.4 s, donde el EPU calculado para Ometepec queda por encima de los espectros interpolados para todos los casos. En la figura 6.30 se comparan los EPU interpolados para valores de p entre 2 y 5, con el EPU calculado para Ometepec, en todo el rango de periodos hasta 4 seg. Se observa que los EPU interpolados quedan sub-estimados hasta un 5.2 % para periodos entre 0 s y 0.4 s; para periodos mayores a 0.4 s, se encuentran por encima de los calculados hasta -5 %, el mejor ajuste se realizó con $p=4$, ya que se equilibran de mejor manera las diferencias porcentuales de las interpolaciones.

6.3. INTERPOLACIÓN IDW

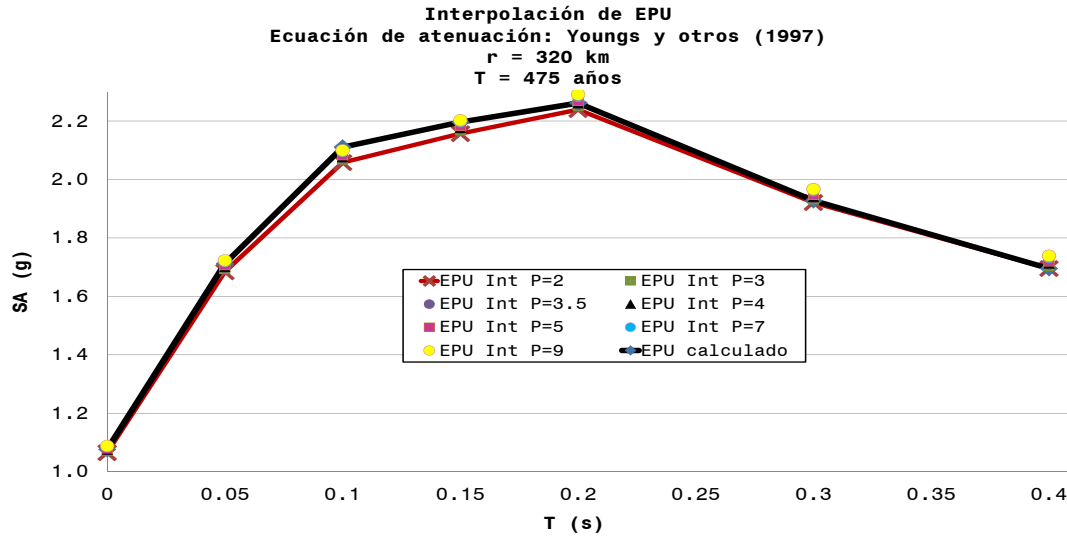


Figura 6.29 EPU interpolados para diferentes valores de p en comparación con el EPU calculado, para periodos menores a 0.4 s con Y97.

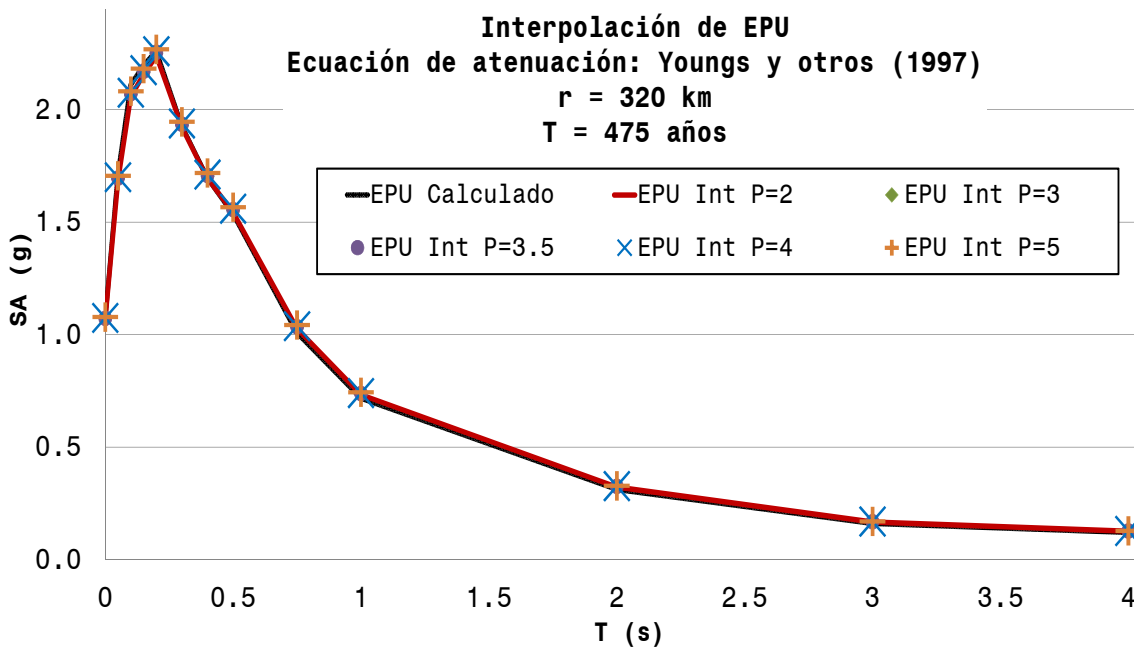


Figura 6.30 EPU calculado e interpolaciones con $2 \leq p \leq 5$, para Y97.

Finalmente, se realizaron las interpolaciones de EPU para la relación de atenuación de Atkinson y Boore (2003), variando el factor de potencia $2 \leq p \leq 9$. Los resultados de las variaciones se presentan en las tablas 6.31 para valores de p de 2 a 4 y la tabla 6.32 para valores de p de 5 a 9.

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE PELIGRO SÍSMICO

T s	EPU calculado SA(g)	p=2		p=3		p=3.5		p=4	
		EPU Int	Δ %	EPU Int	Δ %	EPU Int	Δ %	EPU Int	Δ %
0	0.52	0.53	-1.8 %	0.54	-2.0 %	0.54	-2.1 %	0.54	-2.2 %
0.05	0.79	0.82	-3.1 %	0.83	-3.4 %	0.83	-3.5 %	0.83	-3.7 %
0.1	0.97	1.02	-4.4 %	1.02	-4.9 %	1.02	-5.1 %	1.03	-5.3 %
0.15	1.08	1.12	-3.6 %	1.12	-4.1 %	1.12	-4.4 %	1.13	-4.7 %
0.2	1.16	1.19	-3.8 %	1.20	-4.5 %	1.20	-4.8 %	1.21	-5.1 %
0.3	1.16	1.20	-4.7 %	1.21	-5.4 %	1.21	-5.7 %	1.22	-6.1 %
0.4	1.17	1.21	-4.2 %	1.22	-4.9 %	1.22	-5.3 %	1.23	-5.6 %
0.5	0.98	1.01	-3.4 %	1.02	-4.0 %	1.02	-4.3 %	1.02	-4.6 %
0.75	0.70	0.73	-2.2 %	0.73	-2.6 %	0.73	-2.8 %	0.73	-3.1 %
1	0.56	0.58	-2.0 %	0.58	-2.3 %	0.58	-2.4 %	0.58	-2.6 %
2	0.24	0.25	-0.9 %	0.25	-1.0 %	0.25	-1.1 %	0.25	-1.2 %
3	0.14	0.15	-0.6 %	0.15	-0.6 %	0.15	-0.6 %	0.15	-0.7 %
4	0.11	0.11	-0.5 %	0.11	-0.6 %	0.11	-0.6 %	0.11	-0.6 %

Tabla 6.31 Interpolación del EPU para Ometepec con 4 puntos, para valores de p de 2 a 4 y la relación de atenuación de Atkinson y Boore (2003).

T s	EPU calculado SA(g)	p=5		p=7		p=8		p=9	
		EPU Int	Δ %	EPU Int	Δ %	EPU Int	Δ %	EPU Int	Δ %
0	0.52	0.54	-2.4 %	0.54	-2.7 %	0.54	-2.9 %	0.55	-3.0 %
0.05	0.79	0.83	-4.0 %	0.84	-4.6 %	0.84	-4.8 %	0.84	-5.1 %
0.1	0.97	1.03	-5.7 %	1.04	-6.5 %	1.04	-6.8 %	1.04	-7.1 %
0.15	1.08	1.13	-5.2 %	1.14	-6.1 %	1.14	-6.5 %	1.15	-6.9 %
0.2	1.16	1.21	-5.7 %	1.22	-6.7 %	1.23	-7.2 %	1.23	-7.6 %
0.3	1.16	1.22	-6.7 %	1.23	-7.9 %	1.24	-8.4 %	1.24	-8.9 %
0.4	1.17	1.23	-6.3 %	1.25	-7.6 %	1.25	-8.1 %	1.26	-8.6 %
0.5	0.98	1.03	-5.2 %	1.04	-6.2 %	1.04	-6.7 %	1.05	-7.1 %
0.75	0.70	0.74	-3.5 %	0.75	-4.2 %	0.75	-4.5 %	0.75	-4.8 %
1	0.56	0.59	-2.9 %	0.59	-3.5 %	0.60	-3.7 %	0.60	-4.0 %
2	0.24	0.25	-1.3 %	0.25	-1.5 %	0.25	-1.6 %	0.25	-1.7 %
3	0.14	0.15	-0.7 %	0.15	-0.8 %	0.15	-0.9 %	0.15	-0.9 %
4	0.11	0.11	-0.7 %	0.11	-0.7 %	0.11	-0.8 %	0.11	-0.8 %

Tabla 6.32 Interpolación del EPU para Ometepec con 4 puntos, para valores de p de 5 a 9, para la relación de atenuación de Atkinson y Boore (2003).

- Utilizando 4 puntos de interpolación, se ha encontrado que los valores de $p=2$ logran ajustar con menor error las aceleraciones espectrales de los EPU, con diferencias de -4.7 %, por encima del EPU calculado para Ometepec.
- Para un ajuste de $p=9$, los errores se incrementan hasta valores de -8.9 %, los mayores porcentajes de error para todos los casos, se presentan en periodos menores a 1 s.

6.3. INTERPOLACIÓN IDW

- En todos los casos se tienen sobre-estimaciones de los EPU, y los porcentajes de error disminuyen para periodos mayores a 1 s.

En la figura 6.31 se presentan los EPU interpolados para diferentes valores de p , en un rango de periodos de 0 a 0.5 s, el EPU calculado queda por debajo de los espectros interpolados para todos los casos. La mejor aproximación realizada con $p=2$ se muestra en la gráfica con línea morada.

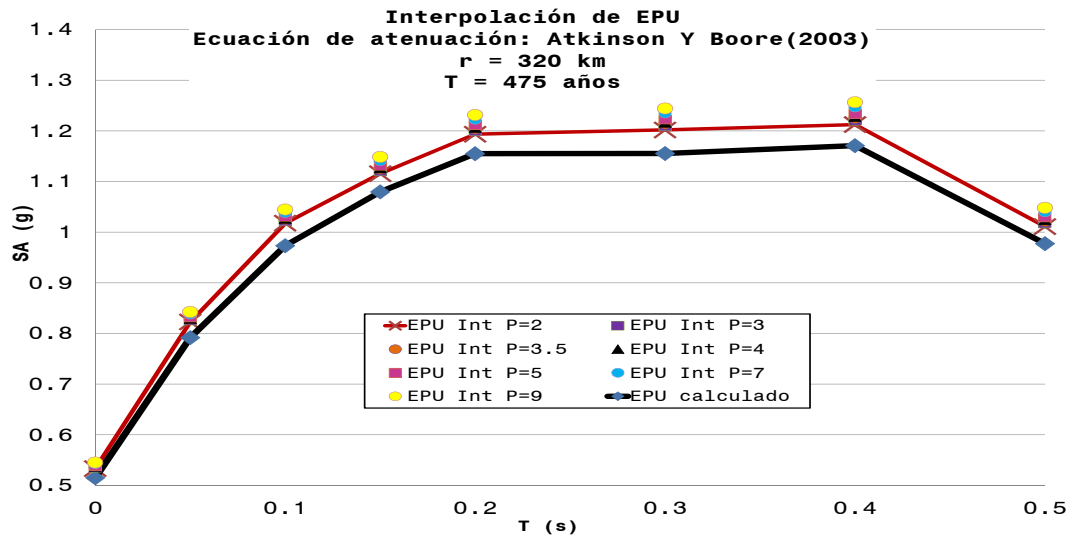


Figura 6.31 EPU interpolados para diferentes valores de p en comparación con el EPU calculado, para periodos menores a 0.5 s con AYB03

En la figura 6.32 se comparan los EPU interpolados para valores de p entre 2 a 5 y 9, con el EPU calculado para Ometepec. Los espectros interpolados presentan aceleraciones espectrales mayores que los calculados para todos los casos, lo que indica que para distancias hasta 70km, no se obtendrán resultados adecuados en interpolaciones de EPU. En este modelo no es importante definir o calibrar el valor del factor de potencia p , debido a que para distancias de interpolación de 70 km, los resultados no se ajustan al EPU calculado para Ometepec. Los modelos 1 y 2, con distancias ≤ 30 km permiten obtener resultados más precisos, con errores menores al 3 %.

Otro factor a tomar en cuenta en la interpolación de EPU, son las fuentes sísmicas, no es recomendable trabajar con distancias de interpolación muy grandes (≥ 70 km), debido a que las fuentes sísmicas que afectan a una región no necesariamente son las mismas en otras regiones a determinadas distancias, como ocurre en la costa del pacífico mexicano. Entonces

surgen problemas de incoherencias con las fuentes sísmicas de los sitios en estudio y todas las variables que se derivan de dichas consideraciones.

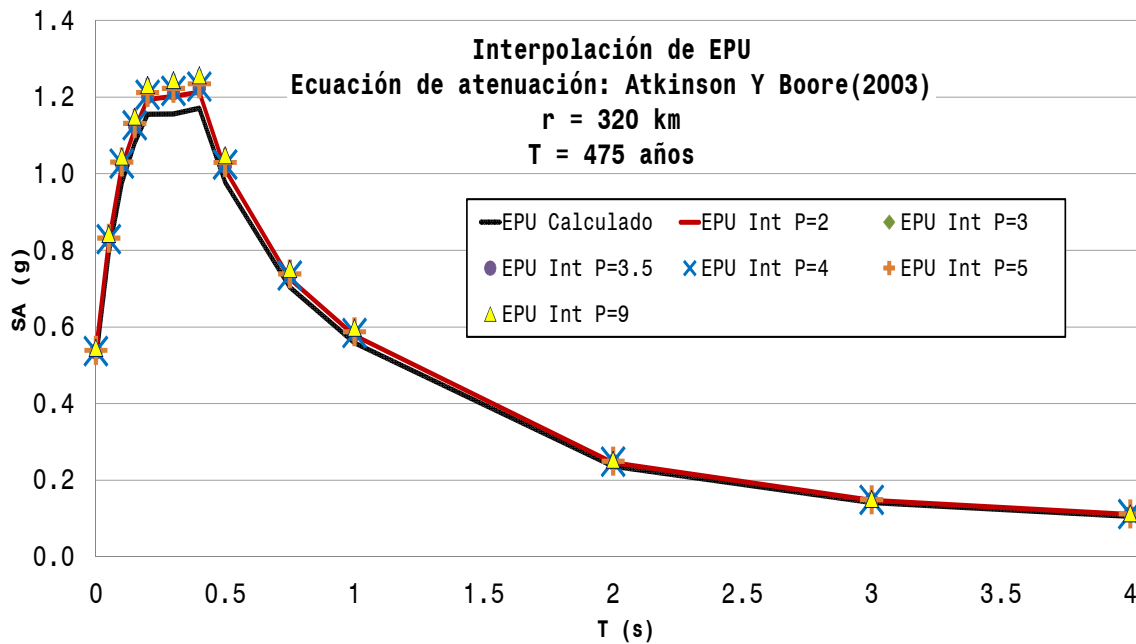


Figura 6.32 EPU calculado e interpolaciones con $4 \leq p \leq 9$, para AYB03

6.4. Obtención de acelerogramas de sitio

Los métodos mencionados en la sección 2.5, son buenas aproximaciones para obtener registros sísmicos que pueden ser utilizados en los análisis sísmicos en el tiempo; sin embargo, se debe adecuar la mejor metodología a los datos que se disponen y las características del problema a tratar. En cualquier caso, se trata de un problema donde el sitio en estudio está afectado por diferentes fuentes sísmicas y se deben recurrir a varios acelerogramas para estimar el comportamiento de la estructura, reglamentos como el UBC (1997), IBC (2000), ASCE (2010), especifican utilizar las respuestas máximas de tres registros sísmicos o siete acelerogramas de los cuales se permite promediar las respuestas máximas.

Los EPU tienen la ventaja de considerar directamente las diferentes fuentes sísmicas que afectan a un sitio en particular (la revisión de fuentes sísmicas se presentó en el capítulo 3), al estimar de manera adecuada los movimientos sísmicos del sitio de estudio se espera una

6.4. OBTENCIÓN DE ACELEROGRAMAS DE SITIO

mejor estimación de la respuesta estructural, siendo posible empatar los acelerogramas de diseño con los EPU.

Cuando se tiene definida la estructura a analizar, es conveniente utilizar un espectro de respuesta condicional (*Conditional Mean Spectrum*, CMS) de un movimiento del suelo (Baker y Allin Cornell, 2006; Baker, 2010); el nivel de aceleración espectral corresponde al del periodo del primer modo de vibrar de la estructura $SA(T_1)$, y mediante un proceso de desagregación se encuentra la combinación de Magnitud-distancia- ϵ que permite definir el CMS, siendo ϵ una medida de la diferencia entre la aceleración espectral de un registro y la calculada con una relación de atenuación para un periodo T_i estudiado.

Algunos trabajos (Baker y Allin Cornell, 2006) han mostrado que utilizar un EPU como espectro objetivo para escalar acelerogramas de sitio resulta conservador, debido a la variación de periodo a periodo de parámetros sísmicos como: magnitud, distancia y ϵ , es decir, cada periodo corresponde a un escenario sísmico diferente; por lo que es complicado concebir un registro sísmico que se escale a todo el contenido del EPU. Un EPU tiene una forma espectral mayor que la de un CMS.

En la figura 6.33 se comparan los dos espectros para el caso de Ometepec, el EPU se obtuvo con la relación de atenuación de Youngs *et al.* (1997) para $T_r=475$ años utilizando el modelo 2 de fallas, y el CMS- ϵ para una aceleración espectral $SA=2.3g$, correspondiente al periodo $T=0.2$ s que representa el valor pico del EPU, con $\epsilon = 0.81$; el cálculo del CMS se realizó para el promedio pesado de las contribuciones de cada fuente sísmica. En el apéndice F se explica un ejemplo de cálculo de un espectro condicional CMS- ϵ

Se observa que el CMS presenta un pico y empata con el EPU en el periodo objetivo (0.2 s), ya que fue calculado condicionado a un $SA(0.2 \text{ s}) = 2.3g$, y el resto de sus ordenadas espectrales presentan valores menores que el pico para todos los periodos (relación $SA_{EPU}/SA_{CMS} = 2.23$ para $T=1$ s). En el último caso se debe contar con un periodo objetivo T^* para condicionar al espectro, que en muchos casos resulta el periodo fundamental de la estructura (para estructuras con contribución de otros modos de vibrar se deben tener más consideraciones).

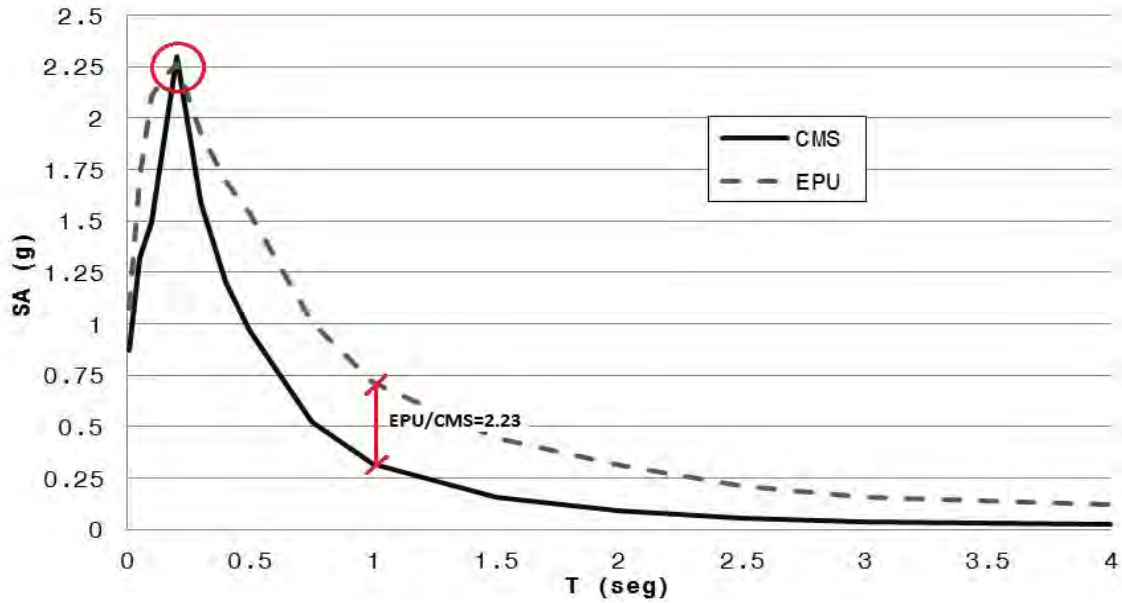


Figura 6.33 Comparación entre el EPU obtenido con la relación de atenuación de Youngs *et al.* (1997) para $T_r=475$ años y el CMS para 2.3 g.

El parámetro ϵ se calcula como: $\epsilon(T) = [\ln SA(T) - \mu_{\ln SA}(M, R, T)] / \sigma_{\ln SA}(T)$, donde $\ln SA(T)$ corresponde a la aceleración espectral en un periodo T del espectro de respuesta de aceleración de un evento sísmico (en este caso del EPU), $\mu_{\ln SA}(M, R, T)$ y $\sigma_{\ln SA}$ corresponden a la aceleración espectral y desviación estándar del $\ln SA$ estimados con alguna relación de atenuación para los parámetros M , R . La figura 6.34 muestra el EPU, CMS y la aceleración espectral calculada con la ecuación Y97 para $M=7.8$ y $R=11.8$ km, producto de la desagregación del EPU con $SA(0.2 \text{ s})=2.3\text{g}$; las aceleraciones espectrales calculadas con Y97 se presentan para fallas intraplaca (intraslab, IS) e interplaca (interface, IF) y la suma de fallas (IF+IS).

En la figura 6.34, se observan los valores de ϵ para 0.2 s del CMS con respecto al espectro de Y97 (IF+IS) igual a 0.81 y de 2.16 para el CMS respecto al espectro de Y97 (IF) (el logaritmo natural de la diferencia de SA del espectro calculado esta a 2.16 veces la desviación estándar del CMS), lo que muestra la variación de ϵ para diferentes espectros; en $T=1 \text{ s}$, $\epsilon=0.61$ para el EPU respecto al espectro de Y97 (IF+IS). Las variaciones del parámetro ϵ permiten la construcción del CMS- ϵ , que representa los valores medios del espectro para todos los periodos condicionando un $SA(T)$ para un sólo periodo, considerando un evento en particular y la atenuación del movimiento respecto a las condiciones de falla.

6.4. OBTENCIÓN DE ACELEROGRAMAS DE SITIO

En este estudio no se consideró el análisis de una estructura en particular, por lo que definir un periodo y una aceleración espectral asociada resulta innecesario, se utilizaron los EPU calculados para Ometepec, reconociendo que los registros de aceleración obtenidos son conservadores; sin embargo, se aconseja que para análisis mas detallados, donde se busquen resultados menos conservadores, se utilicen los CMS- ϵ condicionados a un SA objetivo (Baker y Allin Cornell, 2006; Baker, 2010; NIST, 2011).

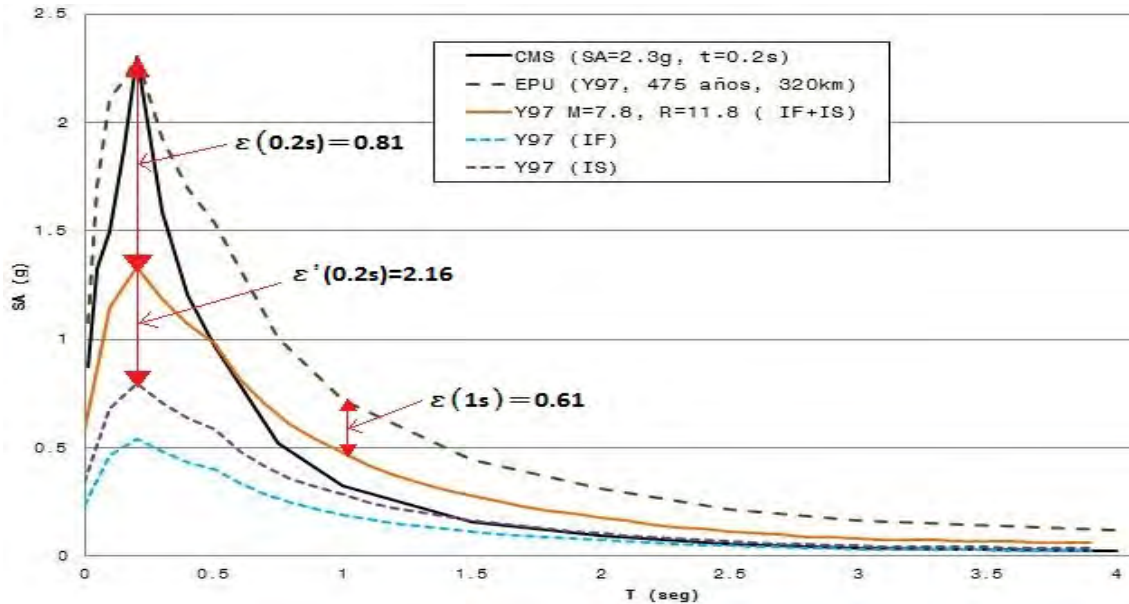


Figura 6.34 Comparación entre el EPU, CMS, y el espectro de aceleración estimado con la relación de atenuación de Y97 para M=7.8, R=11.8 km.

Los EPU utilizados corresponden a los periodos de retorno $T_r=45$ años ($\lambda=0.002107$, 80 % en 50 años) y $T_r=475$ años ($\lambda=0.002107$, 10 % en 50 años), calculados para un radio de influencia de fallas de 320km (caso de estudio 2), para las ecuaciones de Youngs *et al.* (1997) y Atkinson y Boore (2003), con el objetivo de mostrar la metodología alternativa y obtener acelerogramas cuyos espectros se ajusten al EPU para disposición de los ingenieros que así lo requieran.

6.4.1. Desagregación del Peligro sísmico

Es de práctica común en un análisis de peligro sísmico probabilista, expresar la contribución relativa al peligro sísmico de ciertos intervalos de magnitud sísmica, distancia a fuente y ϵ , como información para aproximar características de los eventos sísmicos

esperados para un sitio, dicho proceso es conocido como *Desagregación del Peligro Sísmico*, *DPS* (Disaggregation probabilistic seismic hazard assessment).

La DPS permite identificar los escenarios sísmicos que contribuyen significativamente al peligro sísmico del sitio, con base en un análisis probabilista (Bazzurro y Cornell, 1999; McGuire, 2004). Con este procedimiento se busca obtener la combinación Magnitud (M)-Distancia a la fuente (R), a partir de la función de densidad de probabilidad condicional conjunta de dichos parámetros, considerando un nivel de intensidad sísmica (S_a). En general se puede recurrir a los valores medios de M y R o a las combinaciones bimodales (eventos que ocurren más frecuentemente) de una desagregación M-R para una intensidad sísmica y cierto periodo.

Existe una discusión al respecto de qué parámetros definen de mejor manera los eventos dominantes (Bazzurro y Cornell, 1999), a pesar de ser los más utilizados los valores medios de $\bar{M}$ y $\bar{R}$ pueden describir eventos físicamente irrealizables, mientras que los valores modales (M' , R') necesariamente representan valores reales de magnitud y distancia de fuente, por lo que se deben considerar ambos parámetros. La metodología de este proceso se describió en la sección 2.5.1.

Se realizó la desagregación del peligro sísmico de Ometepepec para cuatro casos, para el peligro sísmico calculado con la ecuación de Y97 y con la relación de atenuación de AYB03; en ambos casos se utilizó el modelo de fuentes sísmicas número dos (radio de influencia 320km), para dos periodos de retorno $T_r=45$ años y $T_r=475$ años, considerando el periodo asociado al valor de aceleración espectral pico (S_A) del EPU correspondiente. En la tabla 6.33 se muestran los valores de $S_A(g)$ y Periodo (T) utilizados en la desagregación, los periodos seleccionados corresponden a los picos de aceleración espectral en cada EPU.

Recurrencia	Y97		AYB03	
	T(seg)	$S_A(g)$	T(seg)	$S_A(g)$
45 años	0.20	0.84	0.40	0.42
475 años	0.20	2.30	0.40	1.17

Tabla 6.33 Parámetros utilizados para la desagregación de M-R y ϵ

En la figura 6.35 se muestran los resultados de la desagregación de magnitud y distancia para el modelo 2 ($r=320$ km) para la relación de atenuación de Y97, las magnitudes de 7 a

6.4. OBTENCIÓN DE ACELEROGRAMAS DE SITIO

8 son las que contribuyen con mayor porcentaje al peligro sísmico de la región. Al igual que distancias de fuente de $R \geq 10$ km, $R \leq 45$ km. Siendo los valores medios para $Tr=45$ años: $\bar{M} = 7.08$, $\bar{R} = 26.8$ km y para $Tr=475$ años: $\bar{M} = 7.28$, $\bar{R} = 11.9$ km.

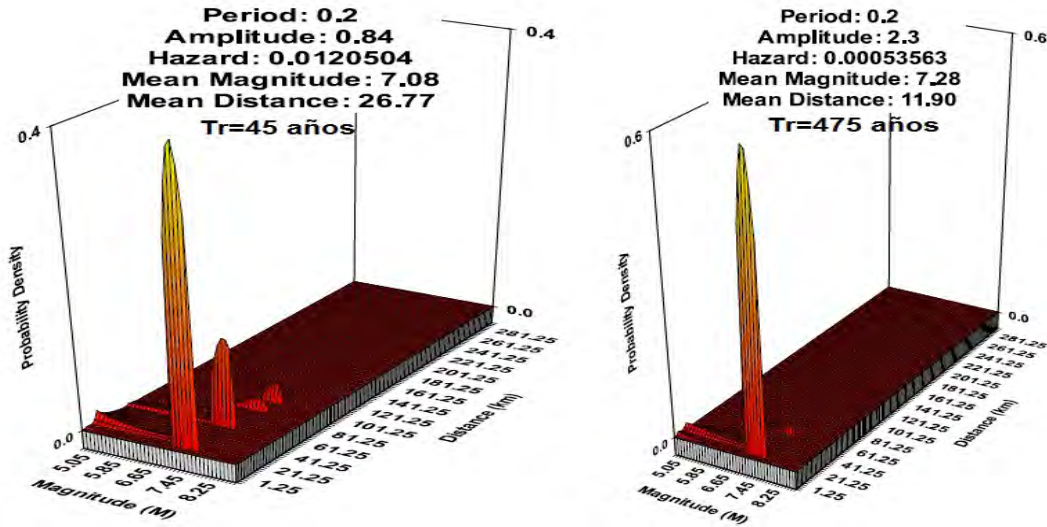


Figura 6.35 DPS - M y R, para el modelo 2 ($r=320$ km) con la relación de atenuación de Y97, para $SA(0.2 \text{ s}) \geq 0.84g$, para $Tr=45$ años (Izq.) y $Tr=475$ años (Der.)

En la figura 6.36 se presenta la desagregación de peligro en función de la distancia a la fuente y la magnitud, para la ecuación AYB03, $SA(0.4s) \geq 0.42g$.

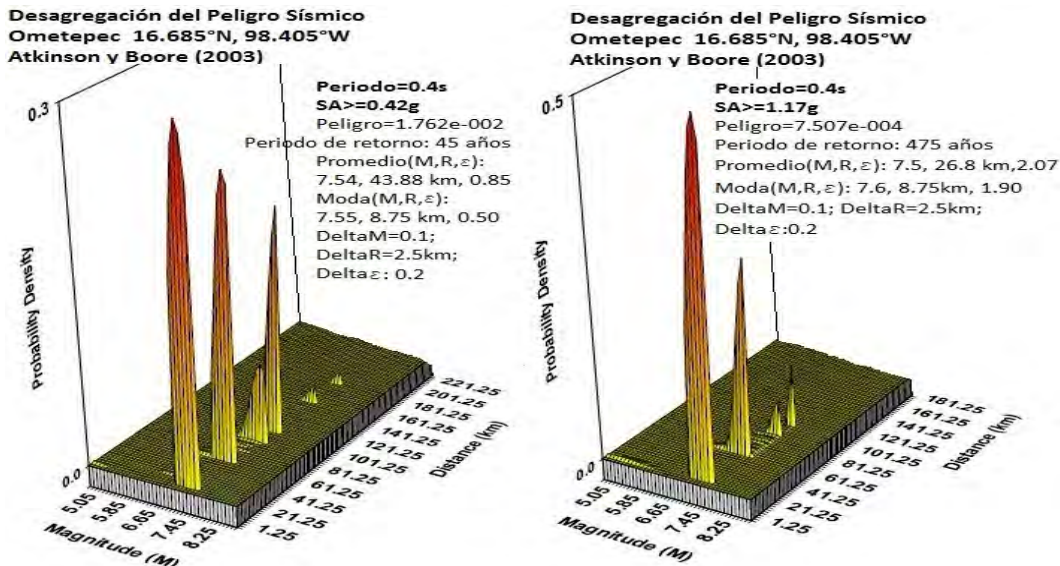


Figura 6.36 DPS - M y R, para el modelo 2 ($r=320$ km) con la relación de atenuación de AYB03, para $SA(0.4 \text{ s}) \geq 0.42g$, para $Tr=45$ años (Izq.) y $Tr=475$ años (Der.)

Se observa que en estos casos se tienen varios escenarios sísmicos, en magnitud se tienen intervalos de 7.2 a 7.9, en distancias se observa que eventos de fuente cercana < 50 km y otros de alrededor de 80 km tienen influencia en los escenarios sísmicos, ya para el segundo caso, los eventos < 40 km dominan el peligro de la zona. Los valores medios indican para $T_r=45$ años: $\bar{M} = 7.54$, $\bar{R} = 43.88$ km y para $T_r=475$ años: $\bar{M} = 7.53$, $\bar{R} = 26.83$ km.

Las distancias menores a 30 km y entre 50-80 km son las que aportan en mayor proporción al peligro sísmico de la región, en cuestión de las magnitudes de momento, se observa que los valores deben ir entre 6.9 a 7.8, indicando que eventos con dichas características son apropiados para ser los acelerogramas semilla. La desagregación por distancia y por magnitud, por separado, se realizó en todos los modelos, y en general la tendencia fue la misma (los resultados se muestran en el apéndice E); al definir cuales son los eventos más representativos de la zona se procedió a buscar entre la Base Mexicana de Sismos Fuertes (BMSF), registros de aceleración que cuenten con las siguientes características:

- Registros de eventos reportados en suelo firme (roca), descartando así posibles efectos de sitio.
- Registros realizados en campo libre.
- Registros con una magnitud de sismo mayor a 6.4 (considerando 0.5 unidades de diferencia en el rango menor) y en todo caso menores a 7.8.
- Distancias de fuente a sitio < 30 km y principalmente entre 50 km y 80 km.
- Los acelerogramas seleccionados, para ambas componentes horizontales se corregirán por línea base y se filtrarán utilizando un filtro con frecuencia baja de 0.1Hz y frecuencia alta de 25Hz (filtro tipo Butterworth).

Idealmente los acelerogramas semilla deben tener las características definidas por la desagregación del peligro, tanto en magnitud, distancia y si fuera el caso, condiciones de sitio. Según Al Atik y Abrahamson (2010) la Magnitud de los eventos seleccionados, no debe ser mayor a ± 0.5 de la resultante como evento de diseño, y las distancias pueden variar hasta ± 20 km.

A pesar de los esfuerzos por encontrar el mejor escenario sísmico, resultado de varios procesos de desagregación del peligro sísmico, la selección de registros pasados que posean

6.4. OBTENCIÓN DE ACELEROGRAMAS DE SITIO

las características definidas en este estudio, se limitó a la poca cantidad de registros cercanos al sitio de estudio. No se recurrió a generar acelerogramas artificiales, debido a que los acelerogramas resultantes podrían perder su carácter no estacionario y existe menor confianza en que capturen características importantes del análisis no lineal de las estructuras (Al Atik y Abrahamson, 2010); por todo lo mencionado se utilizaron registros reales.

Iervolino y Cornell (2005) indican que el proceso de encontrar el mejor escenario M-R con un proceso de desagregación refinado, no afecta la respuesta no lineal de las estructuras significativamente, y se disminuye a segundo plano, sobre todo cuando se va a escalar a un espectro de diseño, ya que es mas importante la forma del espectro del registro; como lo mencionan Al Atik y Abrahamson (2010), con la técnica del Ajuste de Espectros se corregirán las diferencias, afectando lo menor posible el carácter no estacionario del movimiento real, ventaja que presenta dicho método sobre las técnicas de escalamiento a cierto valor objetivo.

Para este trabajo se buscó seleccionar de los pocos registros cercanos a la zona eventos que cumplan con las combinaciones M-R con valores medios y cuyos espectros de aceleración tengan una forma cercana al EPU objetivo. Se han seleccionado dos sismos ocurridos a distancias menores de 70 km de Ometepec y con magnitudes mayores a 6.4, el sismo del 24 de octubre de 1993 y el del 14 de Septiembre de 1995. En la figura 6.37 se muestra la ubicación de los eventos estudiados y las estaciones en las que se tomaron los registros. Los círculos  indican la ubicación designada por la USGS, las estrellas  la ubicación que el Servicio Sismológico Nacional (SSN) designa y los símbolos rectangulares  indican la ubicación de las estaciones donde se registraron los eventos sísmicos estudiados. En las tablas 6.34 y 6.35 se indican características de los registros sísmicos.



Figura 6.37 Ubicación de los dos eventos sísmicos estudiados.

Datos del sismo										
Nro.	Siglas	Fecha del sismo [GMT]	Hora epi-centro (GMT)	M	Coordenadas del epi-centro		Prof. focal (Km)	Fuente de los datos epicen-trales	Δ Tiempo (s)	Datos
1	COPL9310 .241	24-oct-93	07:52:18,2	Mb=6.20 Ms=6.60 Mc=6.50	16.540 Lat. N	98.980 Long. W	19	Instituto de Geofísica, UNAM	0.01	Gal (cm/s/s)
2	VIGA9310 .241	24-oct-93	07:52:18,2	Mb=6.20 Ms=6.60 Mc=6.50	16.540 Lat. N	98.980 Long. W	19	Instituto de Geofísica, UNAM	0.01	Gal (cm/s/s)
3	COPL9509 .141	14-sep-95	14:04:30	Mb=6.4 Ms=7.2 Mc=7.3	16.310 Lat. N	98.880 Long. W	22	Instituto de Geofísica, UNAM	0.01	Gal (cm/s/s)
4	VIGA9509 .141	14-sep-95	14:04:30	Mb=6.4 Ms=7.2 Mc=7.3	16.310 Lat. N	98.880 Long. W	22	Instituto de Geofísica, UNAM	0.01	Gal (cm/s/s)

Tabla 6.34 Parámetros de los registros sísmicos semilla

6.4. OBTENCIÓN DE ACELEROGRAMAS DE SITIO

Nro	Datos de registro						
	Siglas	Estación	Coordenadas de estación		Altitud (msnm)	Tipo de suelo	Institución responsable
1	COPL9310.241	COPALA	16.6050 Lat. N	98.9740 Long. W	40	Roca	Instituto de ingeniería (I.I.) UNAM
2	VIGA9310.241	LAS VIGAS	16.7570 Lat. N	99.2360 Long. W	30	Roca	I.I. UNAM
3	COPL9509.141	COPALA	16.6050 Lat. N	98.9740 Long. W	40	Roca	I.I. UNAM
4	VIGA9509.141	LAS VIGAS	16.7570 Lat. N	99.2360 Long. W	30	Roca	I.I. UNAM

Tabla 6.35 Ubicación de los registros sísmicos semilla

6.4.2. Ajuste de Espectros mediante la técnica de Wavelets en el tiempo

El concepto básico de obtener acelerogramas de sitio, radica en modificar los registros sísmicos de eventos pasados para que sean consistentes con el espectro de diseño, para lo cual se han desarrollado dos metodologías: la del escalamiento simple de amplitud, que implica utilizar un factor de escala en el registro inicial para que su espectro iguale al espectro de diseño en un cierto rango de periodos; y la técnica del Ajuste de Espectros (AE) implica la modificación del contenido de frecuencias de los registros sísmicos iniciales para que logren empatar con el espectro de diseño para todos los periodos considerados.

Como ya se había discutido anteriormente, un evento sísmico cuyo espectro de respuesta en aceleración empata con un EPU resulta conservador en cuanto a las respuestas de desplazamiento de análisis no lineal de ciertas estructuras, ya que el EPU representa la envolvente de múltiples eventos sísmicos; sin embargo, la ventaja de este análisis es la reducción del número de registros sísmicos que se deben utilizar en el análisis, un acelerograma compatible con un espectro equivale a tener tres acelerogramas simplemente escalados en términos de la variabilidad de la respuesta promedio de la estructura resultado de un análisis no lineal (Bazzurro y Luco, 2006).

La técnica del Ajuste de Espectros resuelve ciertas diferencias que puedan existir entre el espectro objetivo y el espectro del acelerograma semilla, producto del proceso de selección de un catálogo de eventos sísmicos (resultado de un proceso de desagregación) donde un factor que toma importancia es la forma del espectro. En la sección 2.7 de este trabajo se ha explicado los tres enfoques que se tienen para realizar el AE, para este trabajo se consideraron

importantes los siguiente puntos:

- Los Espectros de Peligro Uniforme obtenidos en la región de estudio para suelo firme (roca), son la base para obtener acelerogramas.
- Se recurrió al uso de temblores reales porque estos, siendo de intensidad moderada, preservan las características de la fuente sísmica, del trayecto que sigue el campo ondulatorio hasta el sitio en que fue registrado y, especialmente, de las condiciones locales del terreno.
- Debido al proceso de DPS en diferentes escenarios, fue posible utilizar los resultados obtenidos para seleccionar, con base en las características de la fuente sísmica y de la región de estudio eventos sísmicos semilla.
- Se adoptó a la técnica del AE en el dominio del tiempo, ajustando el registro de entrada en el tiempo iterativamente, hasta encontrar compatibilidad con el espectro de respuesta definido mediante la adhesión de Wavelets en rangos de periodo específico y lapsos de tiempo del registro inicial. Esta metodología desarrollada por Al Atik y Abrahamson (2010) fue implementada en el programa RspMatch 2009, mismo procedimiento que se utilizó en este estudio.

Para la técnica del AE, al contar con un registro sísmico semilla $a(t)$, el objetivo es modificar dicho registro, de tal manera que la respuesta del espectro empate la del EPU en todo el rango de frecuencias manteniendo la velocidad y desplazamiento realistas, esto se controla mediante el parámetro de desajuste (misfit) para una frecuencia (ω_i), con un fracción de amortiguamiento crítico (β_i) según: $\Delta R_i = (Q_i - R_i) P_i$, donde Q_i es el valor de SA del espectro objetivo, R_i es el valor de SA del acelerograma semilla y P_i el control de polaridad de la respuesta pico que toma valores de +1 si es positiva y -1 cuando es negativa. Entonces, se busca obtener un función $\delta(t)$ igual al ΔR_i considerando que la función de ajuste se compone de: $\delta a(t) = \sum_{j=1}^N b_j f_j(t)$, donde N es el número de puntos espectrales a ajustar, $f_j(t)$ es la función wavelet que según Al Atik y Abrahamson (2010) corresponde a “the improved tapered cosine wavelet”, y b_j representa los factores de ajuste de amplitud de la función f_j que se determinan de manera iterativa; finalmente al obtener b_j después de un proceso de

6.4. OBTENCIÓN DE ACELEROGRAMAS DE SITIO

cálculo, la corrección al registro se realiza mediante:

$$a_1(t) = a(t) + \gamma \delta a(t) \quad (6.1)$$

Las iteraciones se realizan cambiando el valor actualizado de $a_1(t)$ en lugar de $a(t)$, hasta encontrar un error mínimo, el proceso se realiza en cuatro fases, la primera corrige los periodos cortos (menores a 1 s), en el segundo y tercer paso se corrigen los periodos mayores a 1 s hasta el periodo máximo especificado en el análisis, finalmente en la fase cuatro se reduce y corrigen los desajustes al mínimo posible (ΔR_i).

Los espectros elásticos de los acelerogramas semilla seleccionados en el proceso de desagregación se muestran en la figura 6.38 y 6.39, comparándose con los respectivos EPU para $T_r=45$ años y 475 años, para las dos ecuaciones de atenuación estudiadas (Y97, AYB03). Las formas espectrales de los acelerogramas semilla conservan la forma de los EPU.

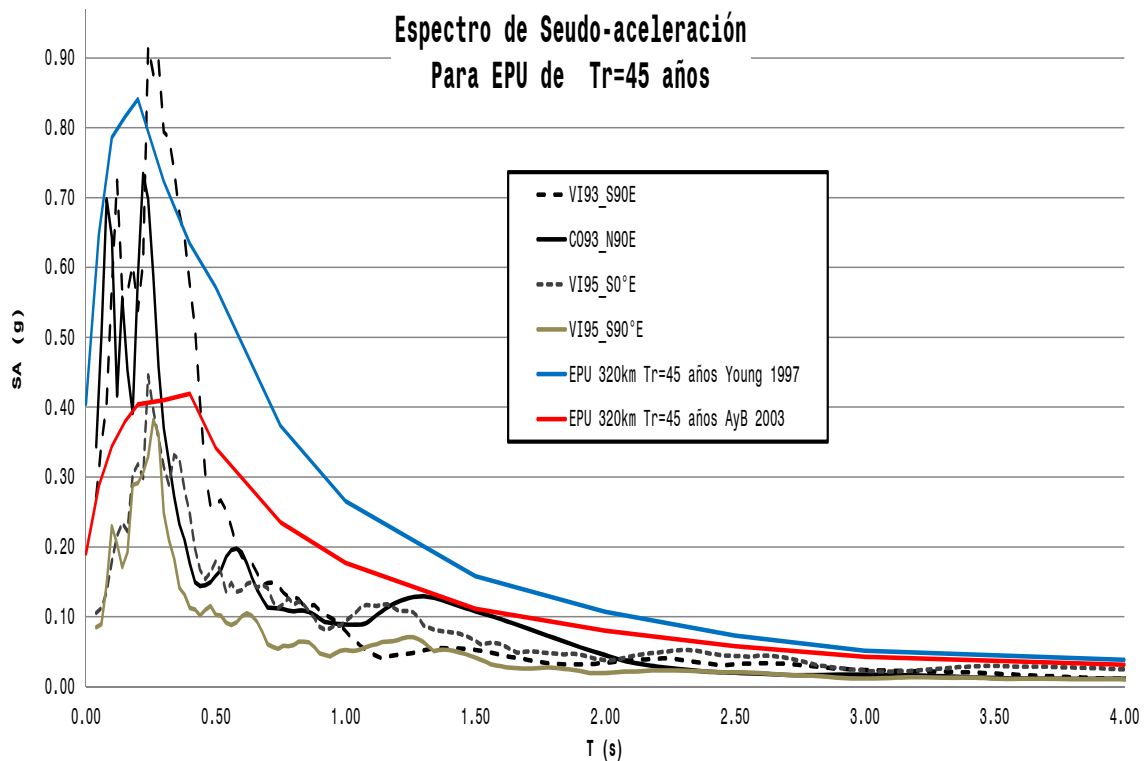


Figura 6.38 Espectros de pseudo-aceleración de los acelerogramas semilla y EPU, $T_r=45$ años

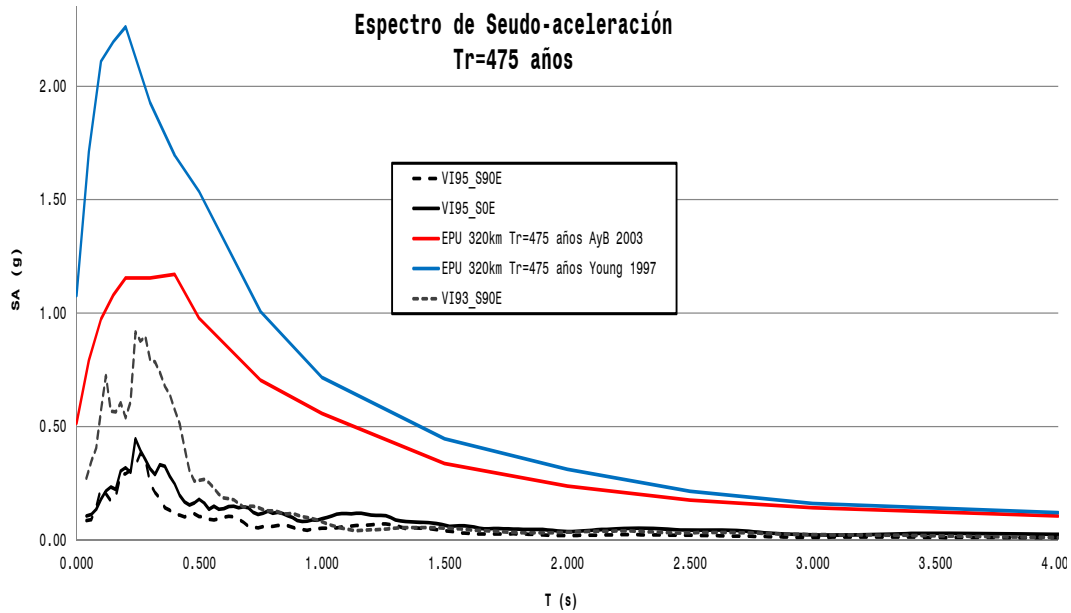


Figura 6.39 Espectros de pseudo-aceleración de los acelerogramas semilla y EPU, Tr=475 años

Luego, se procedió a empatar los acelerogramas semilla con los diferentes EPU, en la figura 6.40 se observa las comparaciones de los espectros de aceleración. La línea negra corresponde al EPU calculado con la relación de atenuación de AYB03 para Tr=475 años y en línea roja el espectro del acelerograma resultado del proceso de empate para el evento VI95_ S90°E. Los siete espectros empatados se muestran en el apéndice E.

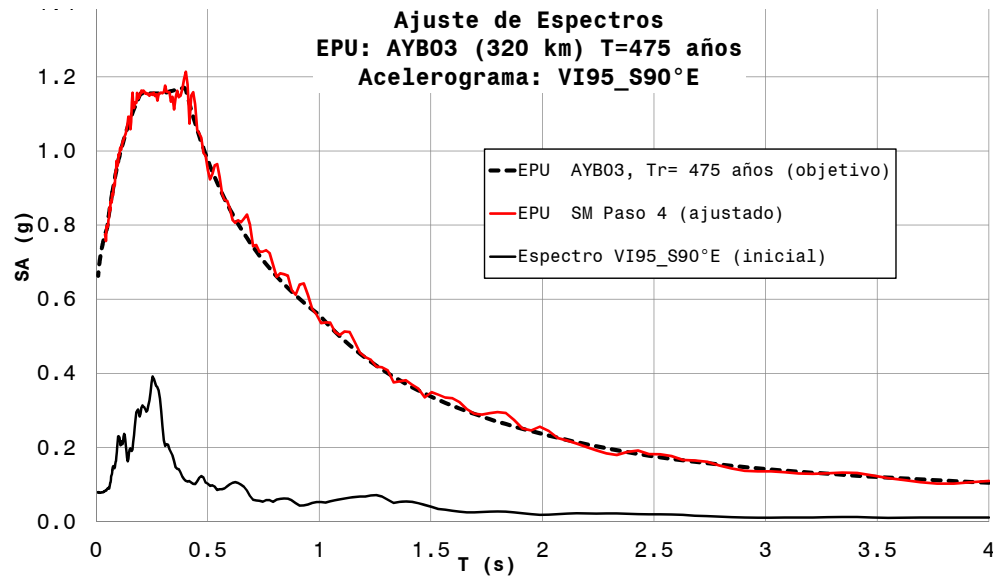


Figura 6.40 EPU para AYB03, Tr=475 años y el espectro del registro VI95 S90°E.

6.4. OBTENCIÓN DE ACELEROGRAMAS DE SITIO

Se puede observar que el espectro empata con diferencias mínimas, la gráfica del Misfit (la diferencia de aceleraciones espectrales) en escala logarítmica se muestra en la figura 6.41, donde se observa que las diferencias medias son mínimas (cercanas a 0.05 en el paso 4) validando la metodología actual.

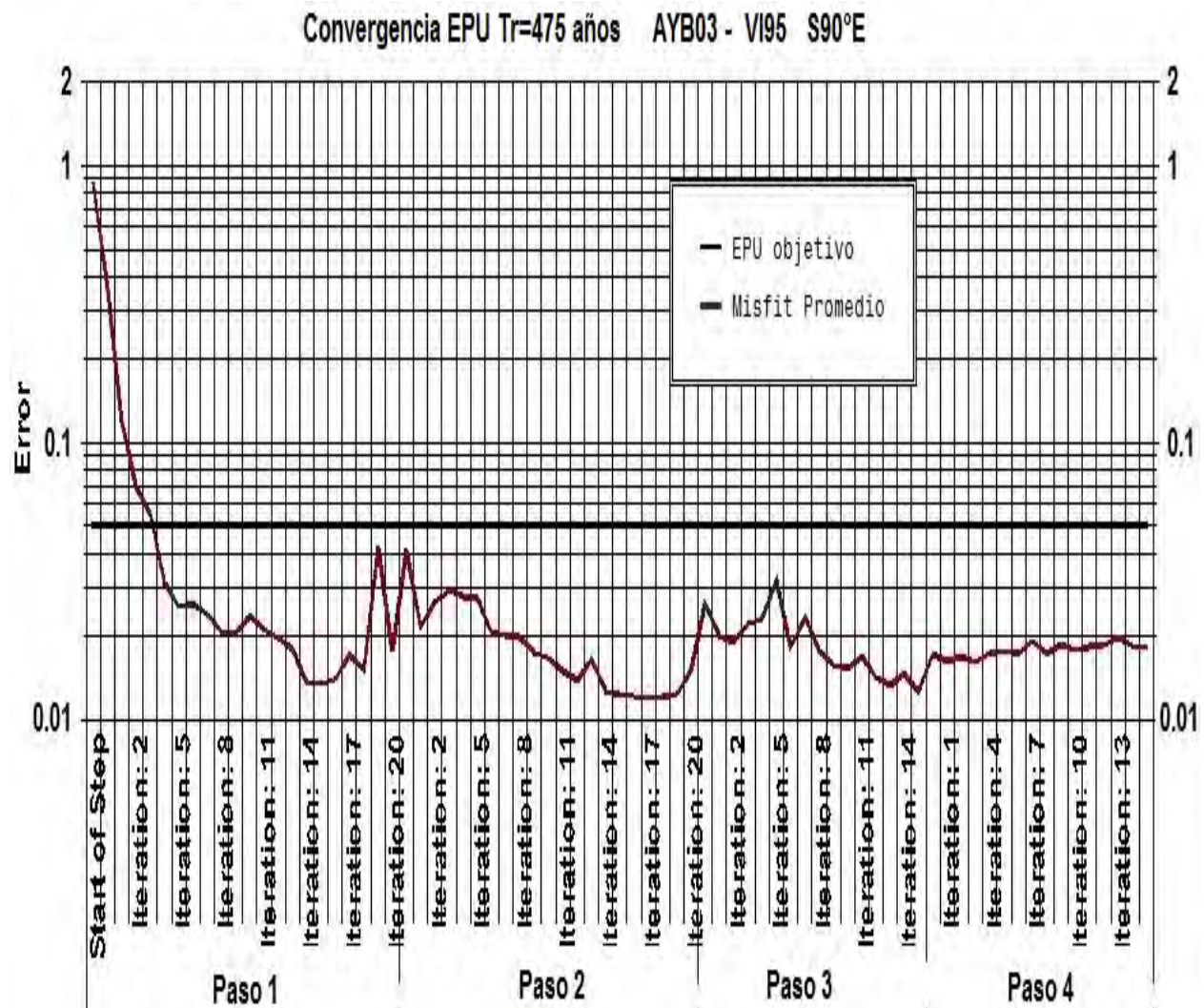


Figura 6.41 Convergencia (misfit) entre EPU calculado para AYB03 para Tr=475 años y el espectro de aceleración del evento VI95 S90°E.

En la figura 6.42 se muestran las comparaciones de los acelerogramas empatados (resultado del paso 4 del proceso de iteración) con los acelerogramas iniciales o semilla, las gráficas para los siete casos se presentan en el apéndice E, junto con los espectros empatados en cada caso.

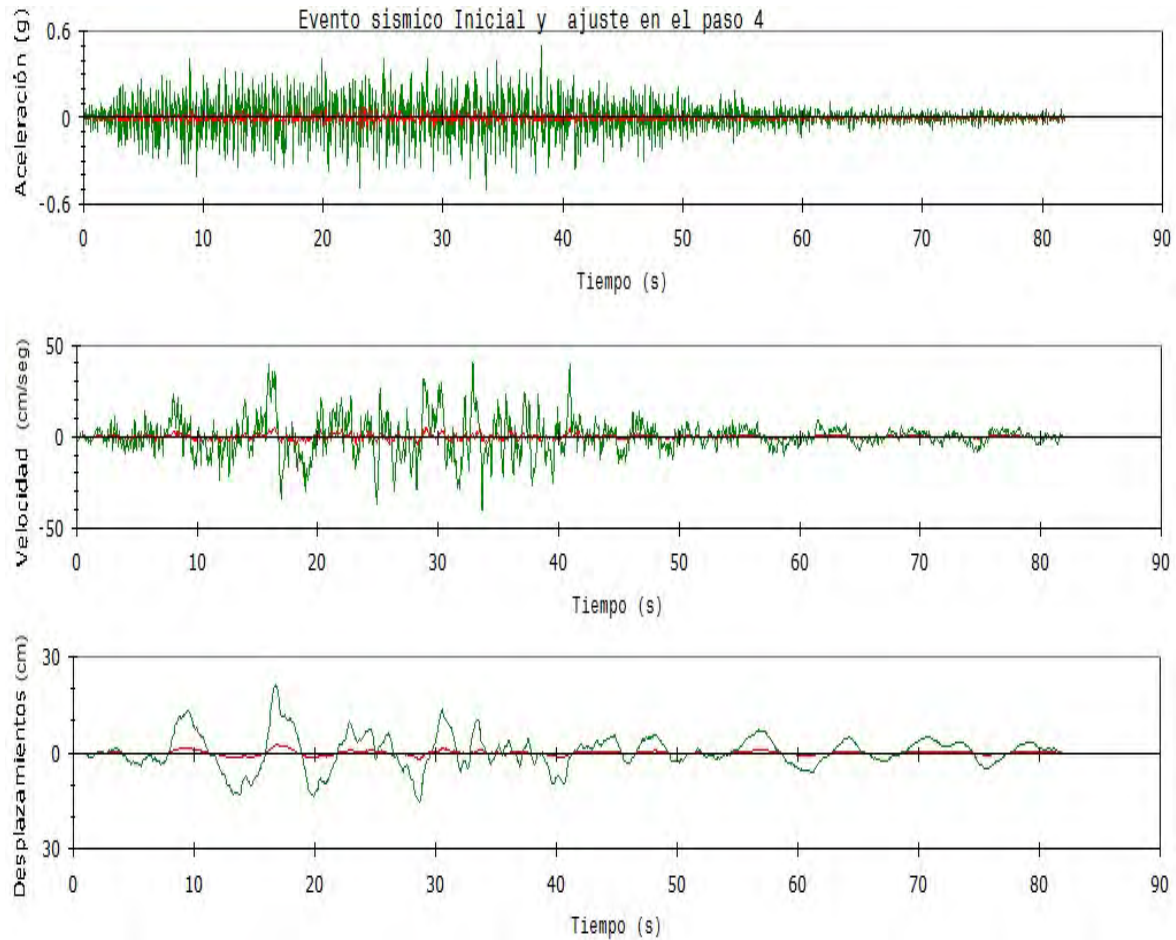


Figura 6.42 Componentes de aceleración, velocidad y desplazamiento del evento inicial VI95 S90°E y el empatado al EPU.

Finalmente, la figura 6.43 muestra una comparación entre el espectro de Fourier inicial del acelerograma semilla (izquierda) y el empatado con EPU para $T_r=475$ años (derecha), y en la figura 6.44 el porcentaje de incremento de la intensidad de Arias en el tiempo; estas comparaciones son un buen parámetro de comprobación de que la metodología utilizada afecta muy poco el carácter no estacionario del evento sísmico, manteniendo la forma del espectro de Fourier y presentando la misma distribución de porcentaje de incremento de intensidad de Arias.

Al controlar la forma de los espectros correspondientes a los acelerogramas semilla, se obtienen buenos resultados con la técnica del Ajuste de Espectros, incluso Iervolino y Cornell (2005) han demostrado que al controlar la forma del espectro, el proceso de escalamiento no perjudica ni presenta grandes dispersiones en la estimación de la repuesta sísmica no lineal

6.5. RESUMEN DE RESULTADOS

de estructuras.

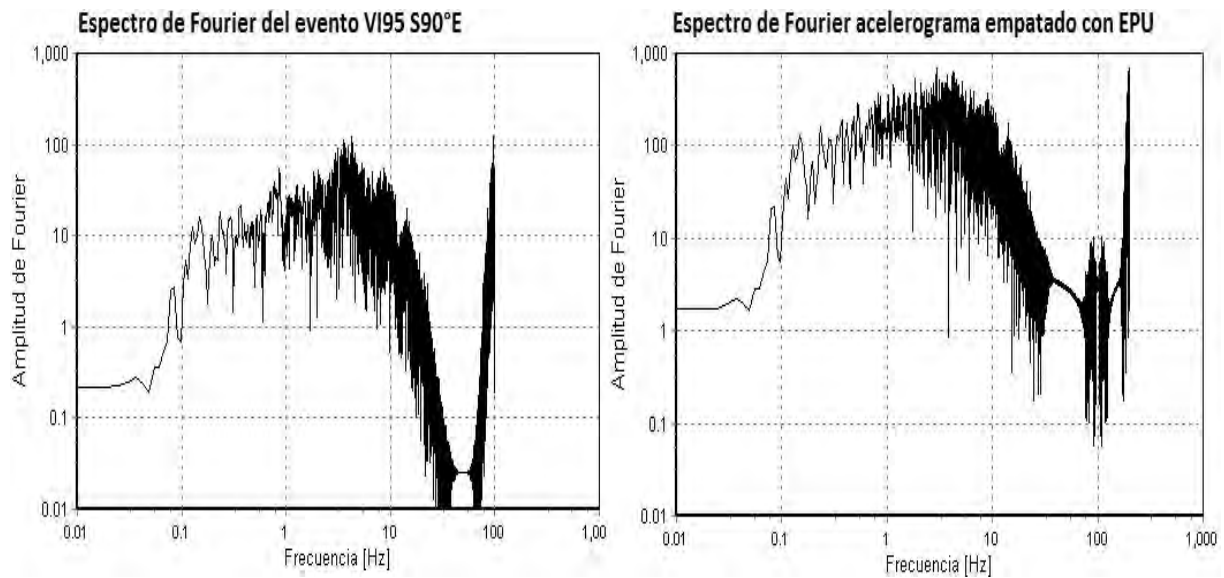


Figura 6.43 Espectros de Fourier para el acelerograma semilla VI95 S90°E (izquierda) y el resultado del SM para el EPU con $Tr=475$ años AYB03 (derecha).

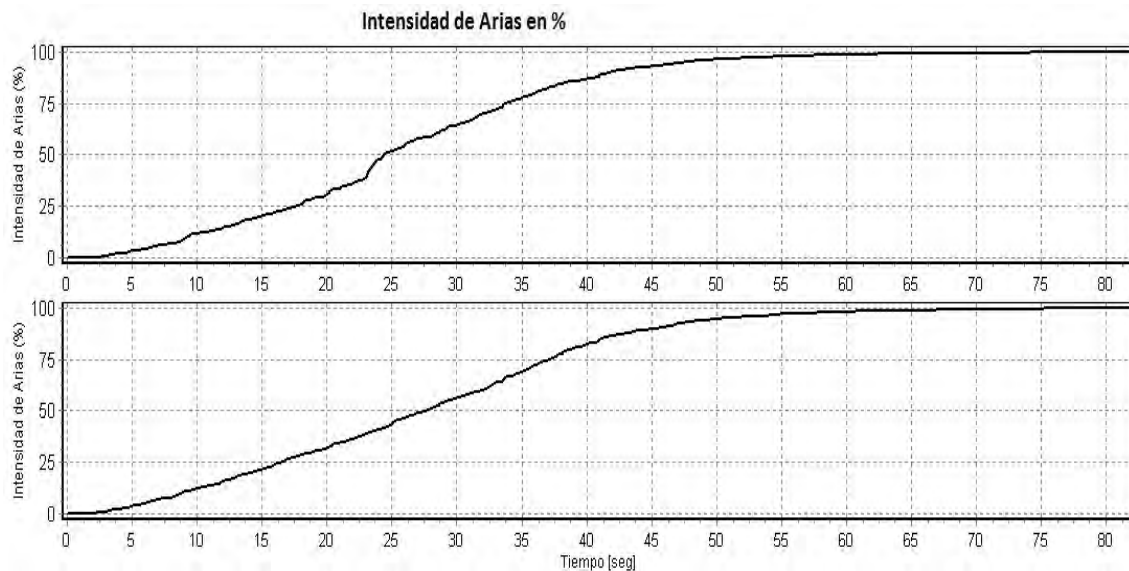


Figura 6.44 Incremento de % de intensidad de Arias para el acelerograma semilla VI95 S90°E (superior) y el resultado del SM para el EPU con $Tr=475$ años AYB03

6.5. Resumen de resultados

Esta sección presenta un resumen de los resultados obtenidos en los diferentes procedimientos realizados, inicialmente en las figuras 6.45 a 6.48 se presentan gráficas de

comparación entre los EPU (para el componente horizontal de aceleración espectral con 5 % de amortiguamiento), calculados en el presente trabajo con los Espectros de diseño del Manual de Obras civiles (MDOC), para las diferentes ecuaciones de atenuación, el procedimiento realizado se explica en la sección 6.2.

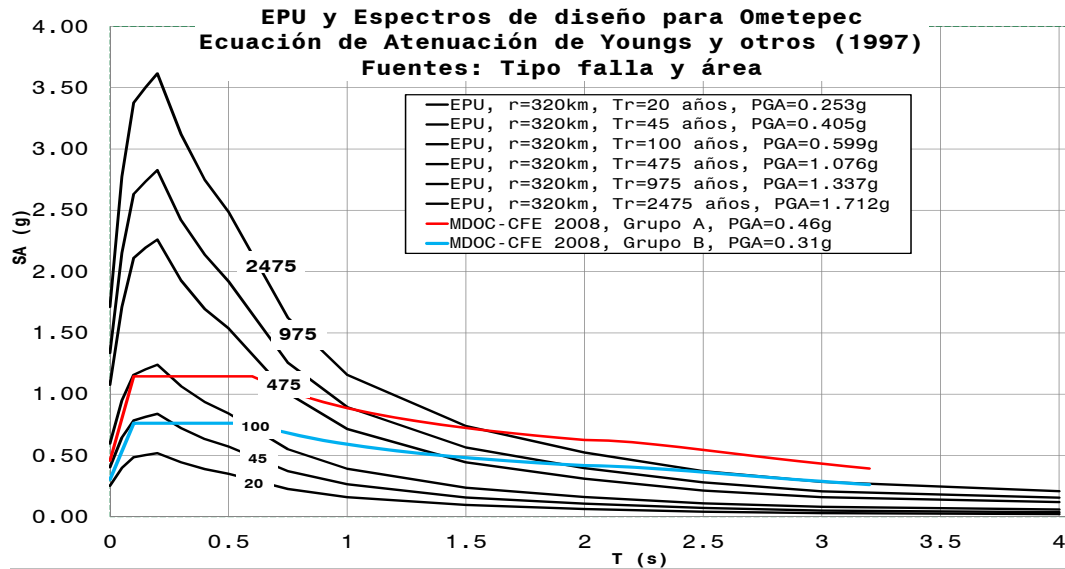


Figura 6.45 EPU para Y97 y espectros de diseño del MDOC, CFE (2008)

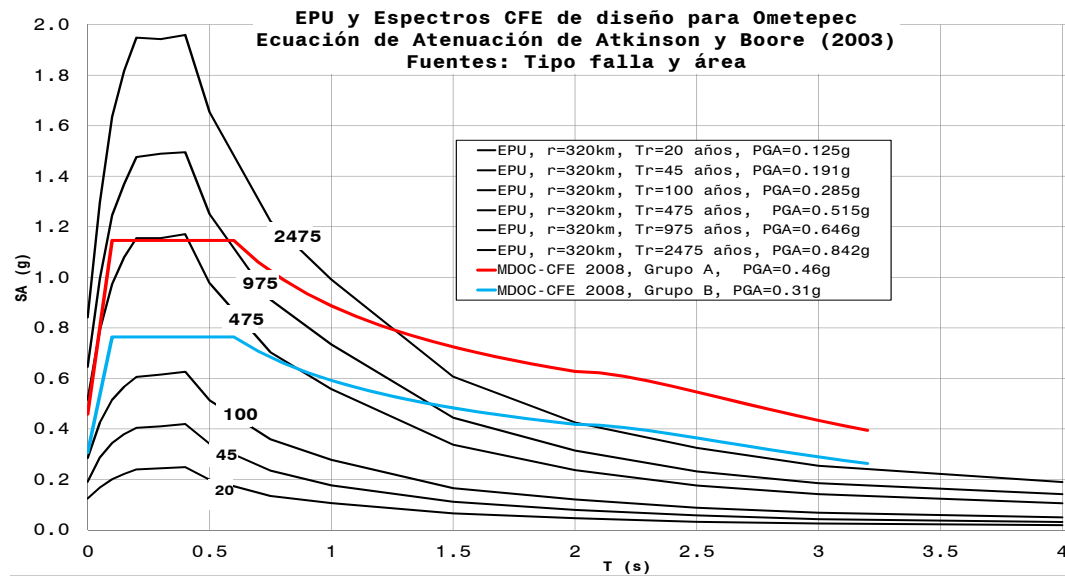


Figura 6.46 EPU para AYB03 y espectros de diseño del MDOC, CFE (2008)

6.5. RESUMEN DE RESULTADOS

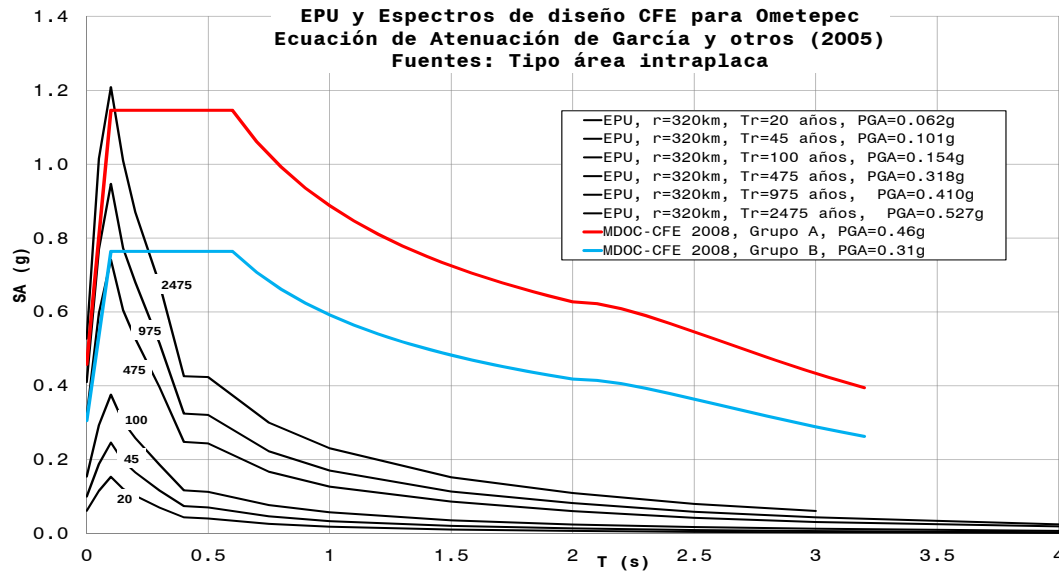


Figura 6.47 EPU para GA05 y espectros de diseño del MDOC, CFE (2008)

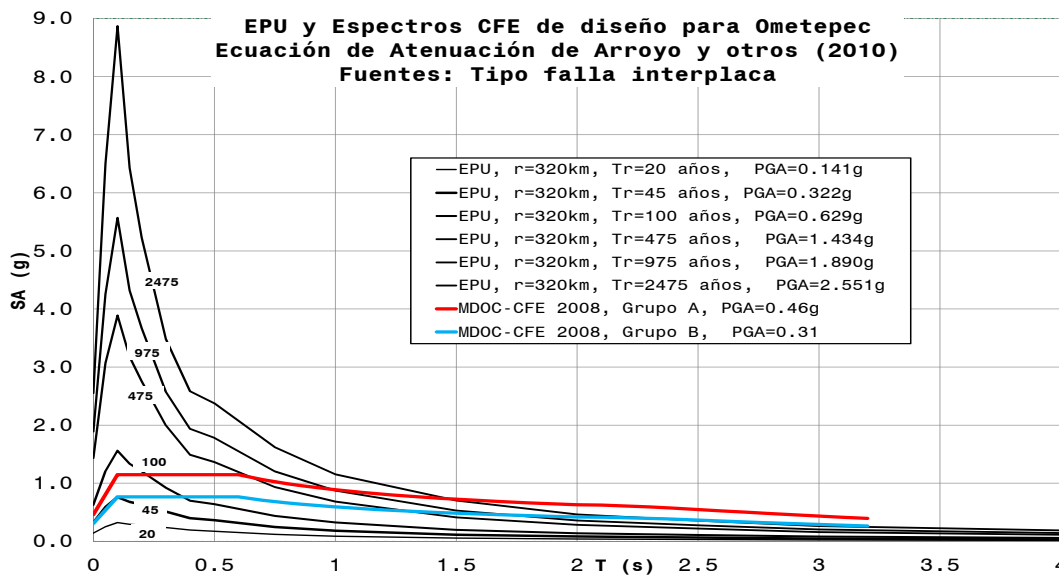


Figura 6.48 EPU para ARR10 y espectros de diseño del MDOC, CFE (2008)

En la tabla 6.36 se presenta la comparación de las aceleraciones pico de terreno (PGA) de los diferentes EPU, para varios periodos de retorno, en comparación con los coeficientes espectrales del Reglamento de Construcciones del Municipio de Ometepec (RCMO, 2009, Art. 316°) y los PGA de los espectros de diseño del MDOC (CFE, 2008), obtenidos con el programa PRODISIS.

PGA de lo EPU con diferentes ecuaciones de atenuación					
PGA(g)	Y97	AYB03	GA05	ARR10	GO12
T=20 años	0.25	0.13	0.06	0.14	0.16
T=45 años	0.41	0.20	0.10	0.32	0.28
T=100 años	0.60	0.29	0.15	0.63	0.31
T=475 años	1.08	0.52	0.32	1.43	0.33
T=975 años	1.34	0.65	0.41	1.90	0.34
T=2475 años	1.71	0.84	0.53	2.55	0.36
Reglamento de Ometepec 2009					
PGA(g)	Grupo A		Grupo B		
Zona I (ROCA)	0.66		0.44		
Zona II	1.29		0.86		
Zona III	1.62		1.08		
MDOC-CFE 2008					
Roca	0.46		0.31		

Tabla 6.36 Comparación de PGA con las diferentes ecuaciones de atenuación.

En las figuras 6.49 y 6.50 se presentan los EPU y los espectros elásticos para 5 % de amortiguamiento, correspondientes a los acelerogramas semilla (definidos en la sección 6.4.1).

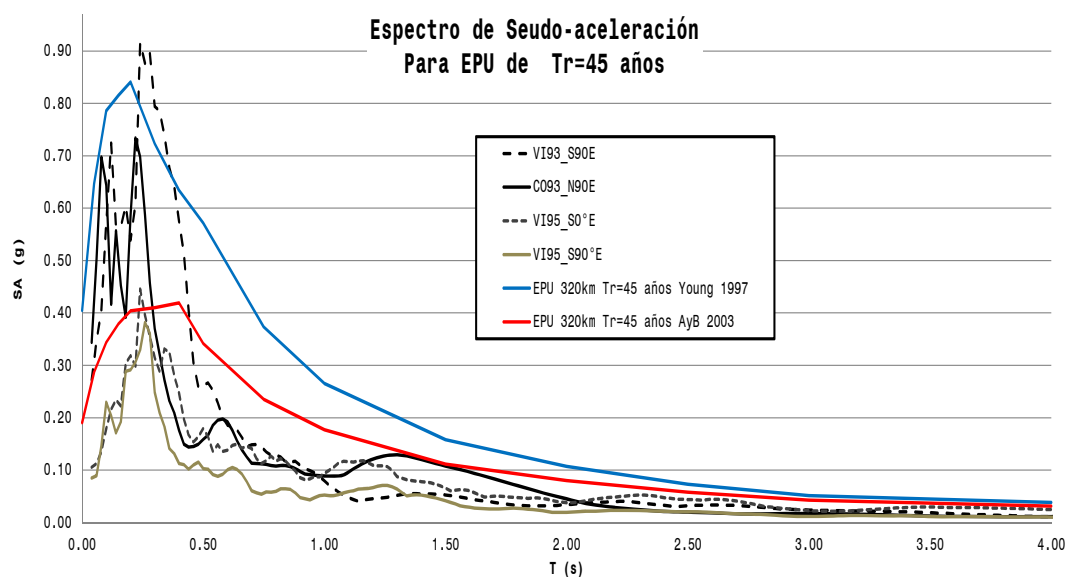


Figura 6.49 Espectros de pseudo-aceleración de los eventos semilla y EPU, Tr=45 años

6.5. RESUMEN DE RESULTADOS

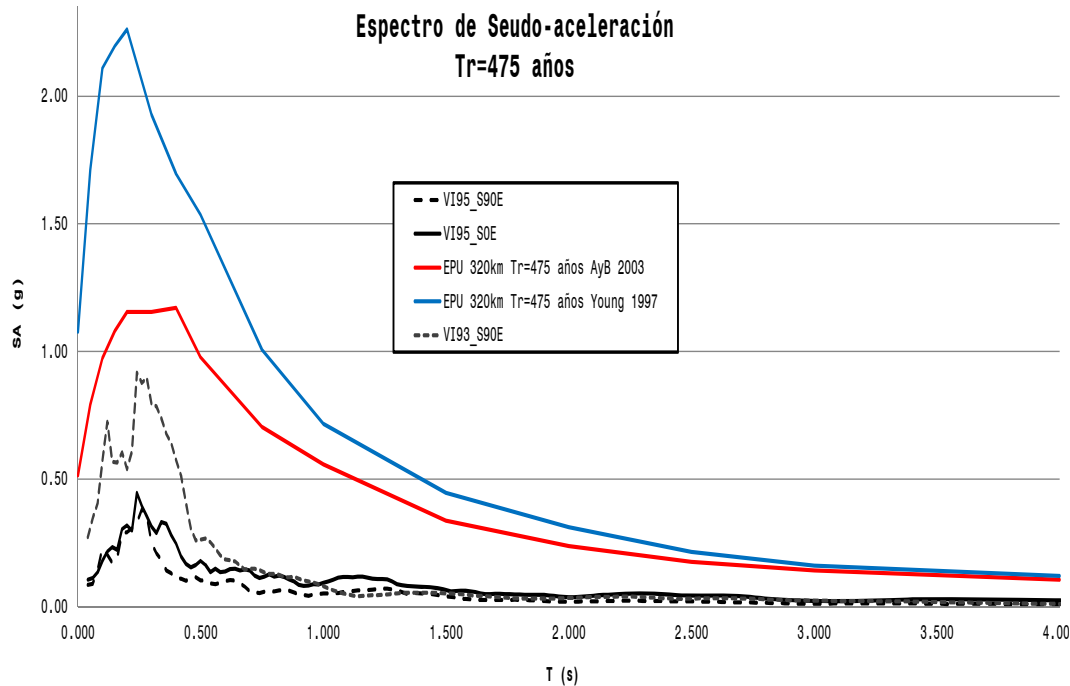


Figura 6.50 Espectros de pseudo-aceleración de los eventos semilla y EPU, $T_r=475$ años

Se pudo observar que la forma de los espectros elásticos de los eventos semilla es muy parecida a los EPU, lo cual resulta un parámetro importante para definir eventos semilla y minimizar las alteraciones al carácter no estacionario de los registros sísmicos semilla, el procedimiento realizado para obtener dichos espectros se explica en la sección 6.4. Finalmente, para observar los acelerogramas de sitio calculados con la técnica de Ajuste de Espectros en el tiempo mediante la adhesión de Wavelets (Al Atik y Abrahamson, 2010), referimos al lector al apéndice E.

En la tabla 6.37 se presentan los parámetros de los puntos utilizados para el procedimiento de interpolación de EPU, realizado en la sección 6.3, donde W_i es el peso asignado a cada punto y $W_i/\sum W_i$ es el factor de peso de cada punto de interpolación. En la tabla 6.38 se presentan los valores de aceleración espectral en unidades de g para diferentes periodos de los EPU calculados en cada punto de interpolación, para el modelo de falla correspondiente, en un rango de periodos de 0 a 4 s, para la relación de atenuación de Youngs *et al.* (1997) y en la tabla 6.39 los resultados para la relación de atenuación de Atkinson y Boore (2003).

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE PELIGRO SÍSMICO

Lugar	Sigla	Latitud °N	Longitud °W	Dist (km)	p	Wi	Wi/ ΣWi
Ometepec	OM	16.6854532	-98.4054066				
San Cristobal	SCr	16.8213291	-98.4033458	15.13	2	4.37E-03	2.46E-01
El Terreno	ET	16.5618197	-98.4396718	14.24	2	4.93E-03	2.77E-01
Px	Px	16.6862833	-98.2601361	15.49	2	4.17E-03	2.34E-01
Py	Py	16.6958361	-98.5475111	15.20	2	4.33E-03	2.43E-01
Azoyú	AZ	16.7325349	-98.6034009	21.75	2	2.11E-03	2.36E-01
Juchitán	JU	16.6254534	-98.6363831	25.52	2	1.54E-03	1.72E-01
San Juan Cacahuatpec	SJC	16.6159740	-98.1566400	27.64	2	1.31E-03	1.46E-01
Xochistlahuaca	XO	16.7918475	-98.2420878	21.06	2	2.26E-03	2.52E-01
Cuajinicuilapa	CUA	16.4698330	-98.4138020	24.02	2	1.73E-03	1.94E-01
Pinotepa de Don Luis	PDL	16.4270769	-97.9765874	54.04	2	3.42E-04	2.89E-01
Coicoyan de Las Flores	CLF	17.2712655	-98.2741236	66.69	2	2.25E-04	1.90E-01
Mesones Hidalgo	MH	16.9135489	-97.9671256	53.16	2	3.54E-04	2.98E-01
Copala	CO	16.6045310	-98.9752460	61.44	2	2.65E-04	2.23E-01

Tabla 6.37 Parametros de cada punto de interpolación.

YOUNGS (1997)										10 % EN 50 AÑOS		Tr=475 años	
T (s)	0	0.05	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4	0.5	0.75	1	2	3	4
OM (r=200 km)	1.074	1.708	2.106	2.190	2.254	1.920	1.689	1.529	1.002	0.714	0.310	0.159	0.121
SCr	1.040	1.659	2.002	2.089	2.163	1.871	1.662	1.520	0.994	0.708	0.309	0.160	0.120
ET	1.091	1.721	2.103	2.174	2.238	1.900	1.673	1.523	1.003	0.714	0.310	0.159	0.120
Px	1.089	1.714	2.088	2.184	2.265	1.946	1.722	1.570	1.040	0.740	0.323	0.167	0.126
Py	1.079	1.704	2.078	2.145	2.206	1.883	1.664	1.514	0.994	0.706	0.305	0.157	0.118
Interpolación D<15km	1.075	1.700	2.069	2.148	2.218	1.899	1.680	1.531	1.007	0.717	0.312	0.161	0.121
OM (r=320 km)	1.076	1.712	2.110	2.196	2.262	1.928	1.695	1.536	1.008	0.717	0.311	0.161	0.121
AZ	1.078	1.703	2.076	2.144	2.204	1.881	1.665	1.515	0.994	0.706	0.304	0.156	0.117
JU	1.091	1.723	2.109	2.167	2.223	1.886	1.662	1.509	0.990	0.703	0.303	0.155	0.117
SJC	1.129	1.777	2.180	2.284	2.373	2.031	1.795	1.632	1.086	0.773	0.339	0.175	0.133
XO	1.056	1.678	2.027	2.128	2.210	1.912	1.696	1.552	1.024	0.730	0.319	0.166	0.124
CUA	1.099	1.728	2.129	2.201	2.267	1.920	1.685	1.530	1.014	0.720	0.314	0.161	0.122
Interpolación D<30km	1.086	1.716	2.095	2.175	2.246	1.919	1.695	1.543	1.018	0.724	0.315	0.162	0.122
OM (r=320 km)	1.076	1.712	2.110	2.196	2.262	1.928	1.695	1.536	1.008	0.717	0.311	0.161	0.121
PDL	1.162	1.822	2.251	2.365	2.463	2.090	1.835	1.665	1.121	0.799	0.355	0.183	0.138
CLF	0.885	1.403	1.709	1.812	1.882	1.646	1.453	1.323	0.873	0.628	0.277	0.148	0.110
MH	1.041	1.666	1.995	2.099	2.187	1.905	1.700	1.561	1.032	0.738	0.327	0.170	0.128
CO	1.125	1.769	2.187	2.257	2.322	1.957	1.713	1.551	1.028	0.728	0.313	0.159	0.120
Interpolación D<70km	1.065	1.684	2.058	2.156	2.239	1.921	1.695	1.544	1.027	0.732	0.322	0.167	0.126

Tabla 6.38 Valores de SA(g) de los EPU calculados con la ecuación de Y97.

6.5. RESUMEN DE RESULTADOS

ATKINSON Y BOORE (2003)										10 % EN 50 AÑOS		Tr=475 años	
T (s)	0	0.05	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4	0.5	0.75	1	2	3	4
OM (r=200 km)	0.508	0.787	0.972	1.086	1.169	1.189	1.222	1.020	0.742	0.595	0.254	0.141	0.107
SCr	0.529	0.811	1.000	1.103	1.182	1.175	1.183	0.992	0.716	0.569	0.240	0.145	0.107
ET	0.486	0.749	0.923	1.025	1.096	1.107	1.127	0.942	0.676	0.537	0.228	0.138	0.102
Px	0.536	0.827	1.023	1.132	1.211	1.216	1.235	1.025	0.738	0.584	0.245	0.146	0.109
Py	0.500	0.765	0.941	1.040	1.116	1.114	1.127	0.942	0.678	0.538	0.229	0.137	0.102
Interpolación D<15km	0.512	0.787	0.970	1.073	1.149	1.151	1.166	0.974	0.701	0.556	0.235	0.141	0.105
OM (r=320 km)	0.515	0.792	0.973	1.080	1.155	1.155	1.171	0.977	0.704	0.558	0.237	0.142	0.105
AZ	0.503	0.770	0.946	1.043	1.120	1.115	1.126	0.940	0.676	0.536	0.229	0.137	0.102
JU	0.477	0.731	0.901	0.994	1.066	1.071	1.085	0.908	0.651	0.517	0.221	0.134	0.100
SJC	0.546	0.844	1.050	1.157	1.244	1.257	1.284	1.057	0.758	0.600	0.252	0.148	0.111
XO	0.544	0.840	1.036	1.146	1.224	1.223	1.236	1.032	0.743	0.590	0.249	0.149	0.110
CUA	0.474	0.733	0.904	1.006	1.077	1.095	1.122	0.935	0.669	0.532	0.226	0.136	0.102
Interpolación D<30km	0.510	0.784	0.968	1.070	1.147	1.151	1.169	0.974	0.699	0.555	0.236	0.141	0.105
OM (r=320 km)	0.515	0.792	0.973	1.080	1.155	1.155	1.171	0.977	0.704	0.558	0.237	0.142	0.105
PDL	0.534	0.829	1.036	1.146	1.239	1.277	1.287	1.076	0.766	0.607	0.255	0.148	0.112
CLF	0.543	0.827	1.015	1.086	1.150	1.131	1.125	0.943	0.689	0.554	0.243	0.151	0.113
MH	0.577	0.889	1.099	1.204	1.285	1.281	1.296	1.080	0.779	0.622	0.264	0.160	0.119
CO	0.467	0.723	0.888	0.983	1.049	1.060	1.079	0.894	0.634	0.500	0.212	0.128	0.096
Interpolación D<70km	0.533	0.823	1.018	1.116	1.193	1.202	1.213	1.011	0.726	0.578	0.246	0.148	0.111

Tabla 6.39 Valores de SA(g) de los EPU calculados con la ecuación de AYB03.

En la figura 6.51 se presenta la ubicación de todos los puntos de interpolación utilizados en los tres modelos estudiados en este trabajo.

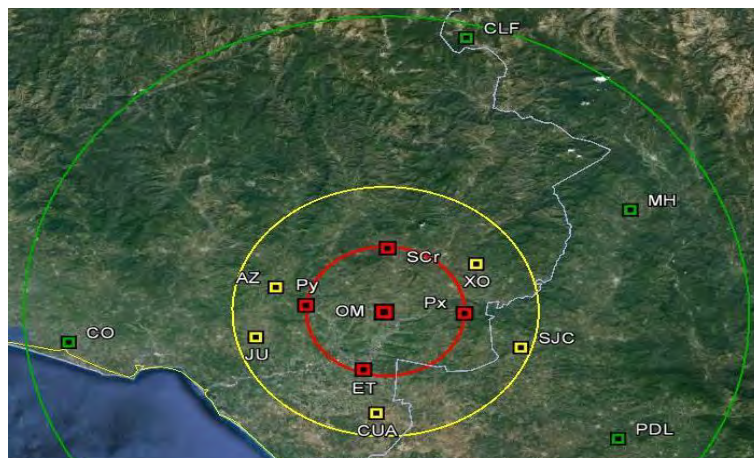


Figura 6.51 Ubicación de los puntos de interpolación utilizados para los modelos del método de interpolación de la distancia inversa (IDW), Shepard (1968).

Finalmente, se propone que el EPU para Ometepec debe ser el presentado en la figura 6.52, los espectros con periodo de retorno de $Tr=20$ años, $Tr=45$ años y $Tr=100$ años, deben ser utilizados para los tres niveles de desempeño sísmico de la región en estructuras del Grupo B; mientras que los EPU para periodos de retorno $Tr=475$ años y $Tr=975$ años deben ser utilizados para estructuras especiales y de gran importancia, Grupo A según los reglamentos actuales.

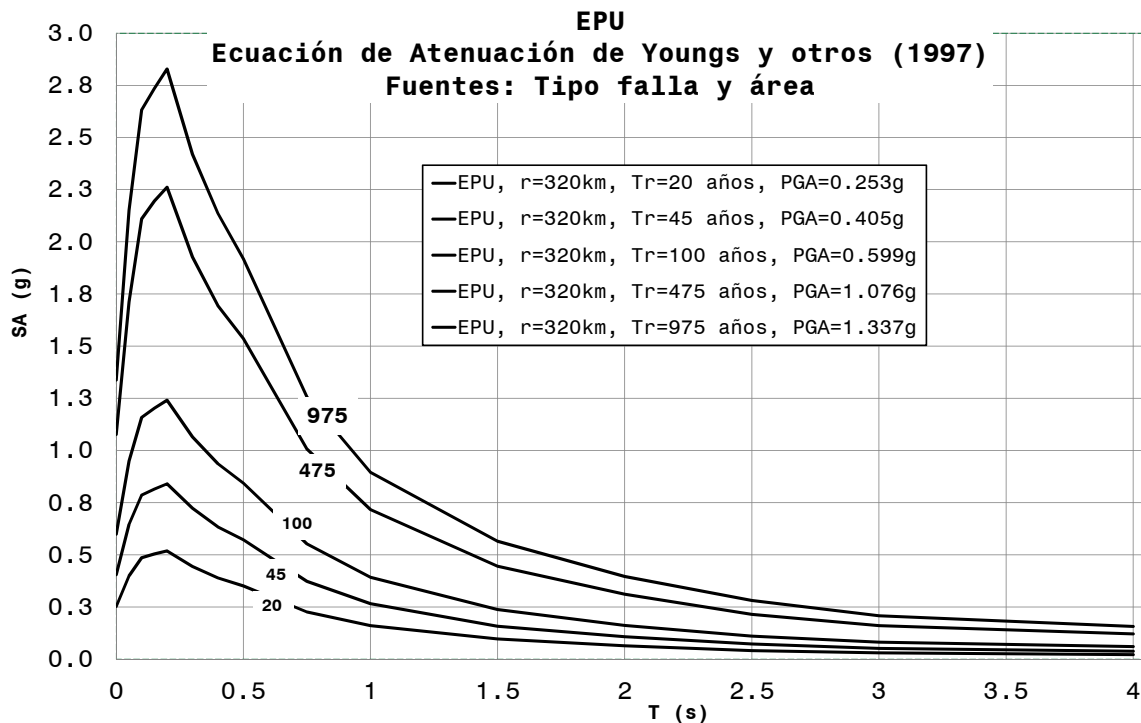


Figura 6.52 Espectros de Peligro uniforme propuestos para Ometepec, considerando diferentes niveles de desempeño sísmico.

Para realizar análisis no lineales en el tiempo se proponen acelerogramas de sitio para suelo firme, descritos en la sección 6.4.2, para estructuras del Grupo B en la figura 6.53, que se obtuvieron del ajuste de espectros con los EPU estudiados para el sitio y periodo de retorno de 45 años. Y en la figura 6.54, se presentan los acelerogramas para periodos de retorno mayores ($Tr=475$ años, para estructuras del grupo B). Tanto los acelerogramas semilla, como los registros sísmicos en el tiempo obtenidos en este estudio se presentan en el apéndice E.

6.5. RESUMEN DE RESULTADOS

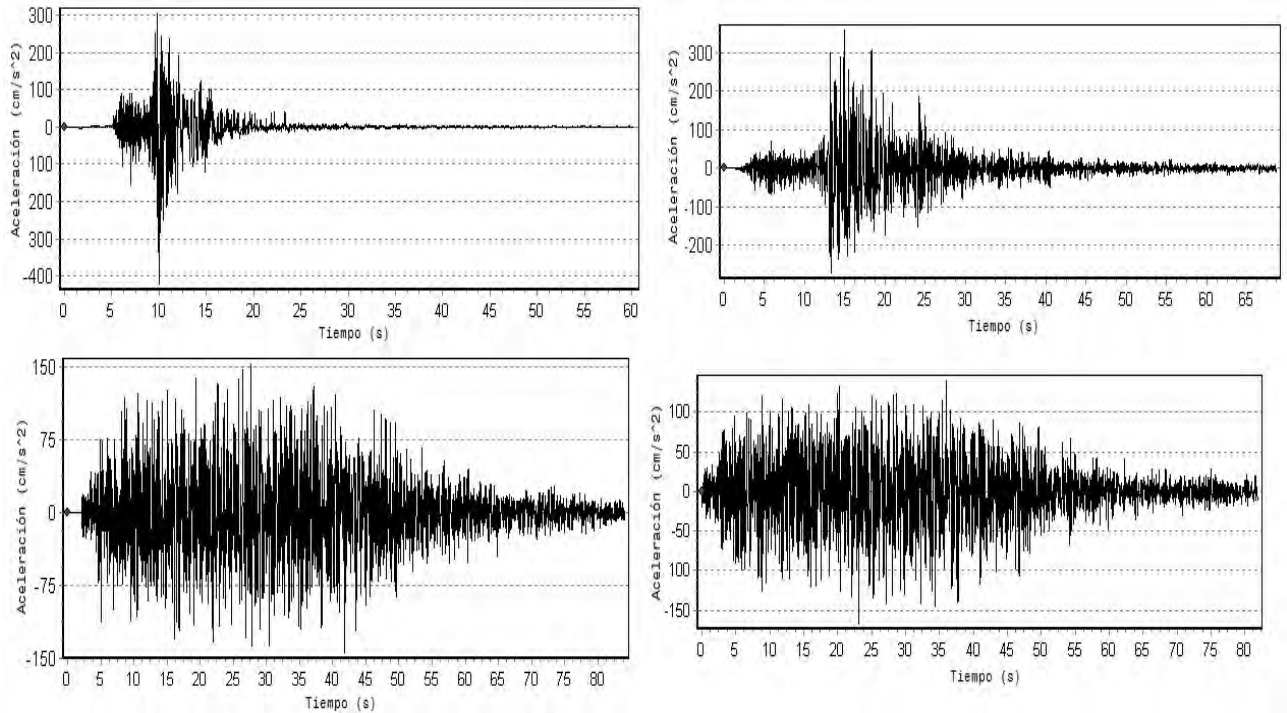


Figura 6.53 Acelerogramas de sitio para suelo firme, obtenidos para estructuras del grupo B.

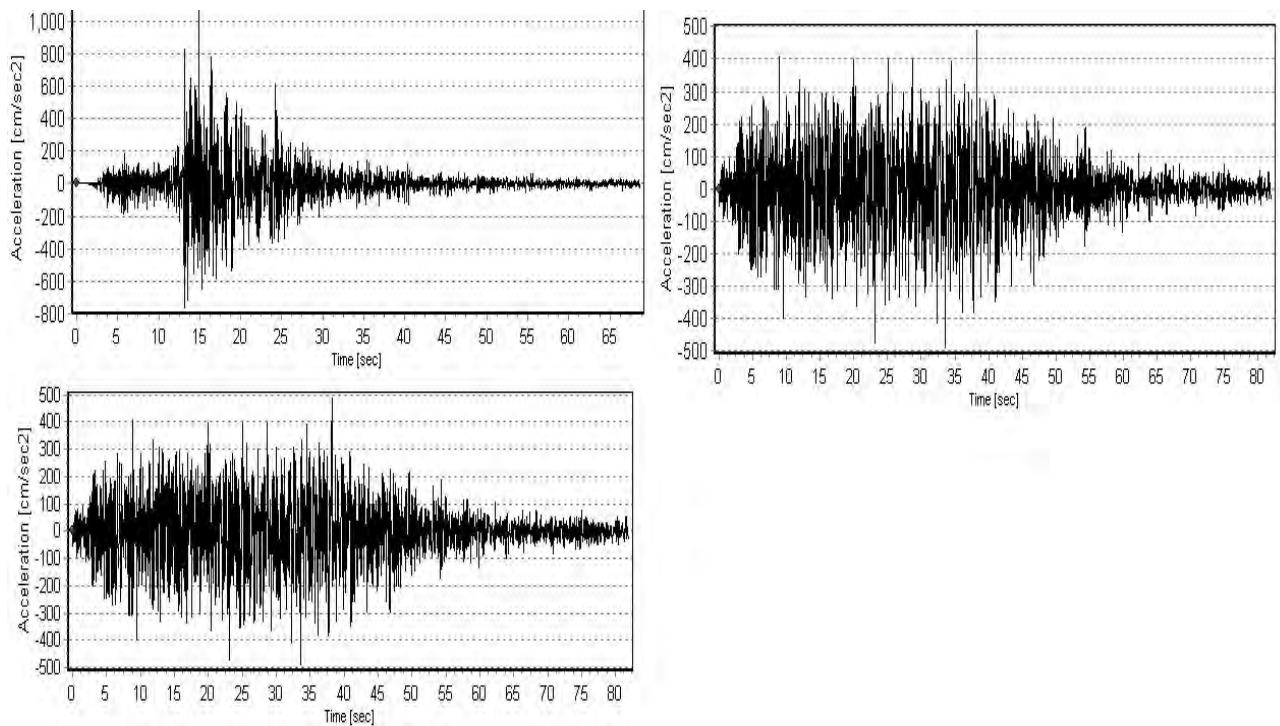


Figura 6.54 Acelerogramas de sitio para suelo firme, obtenidos para estructuras del grupo A.



7 Conclusiones

*A los ingenieros civiles, la naturaleza nos dió los
sismos para mantenernos humildes.*

N. Ambraseys

7.1. Contribuciones

- Se ha estudiado y presentado el potencial sísmico para el segmento Ometepec en términos del peligro sísmico existente en la región. Se presentan EPU para Ometepec considerando diferentes periodos de retorno (figura 6.1), y EPU para ciudades cercanas a Ometepec para un periodo de retorno de 475 años (las magnitudes de aceleración espectral normalizadas con la magnitud se presentan en la tabla 6.38). Los EPU calculados para Ometepec pueden ser utilizados para el diseño sísmico de estructuras, las cuales pueden ser clasificadas según los reglamentos actuales (RCMO, 2009; CFE, 2008) como: a) estructuras pertenecientes al Grupo B, cuyos EPU corresponden a periodos de retorno de 20 años, 45 años y 100 años (eventos leves a moderados); b) estructuras del Grupo A, con EPU con periodos de 475 años (eventos severos), y estructuras especiales para excitaciones sísmicas extremas con periodos de retorno de 975 años y 2475 años; cabe resaltar que la elección de los EPU a utilizar depende del nivel de peligro sísmico aceptable y los objetivos de diseño que se buscan alcanzar.
- Con el objetivo de obtener una malla de puntos con Espectros de Peligro Uniforme (EPU) conocidos para el segmento Ometepec, que puede ser ampliada e implementada

7.2. CONCLUSIONES GENERALES

para uso público (como ocurre con el reglamento de diseño NBCC (2005) de Canadá), se ha presentado y evaluado una metodología alternativa para generar EPU a partir de valores conocidos, utilizando el Método de Ponderación de distancia inversa (IDW) (Shepard, 1968). Los resultados del procedimiento son EPU calculados para el sitio en estudio mediante la interpolación de EPU en puntos conocidos, considerando las fuentes sísmicas que afectan al peligro de la región y las relaciones de movimiento fuerte del suelo correspondientes. La metodología utilizada en este trabajo, se presenta como alternativa a las ya existentes, como por ejemplo, la metodología desarrollada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE, 2008), aplicada en el programa PRODISIS para todo el territorio mexicano.

- Se presentan siete acelerogramas de sitio (mostrados en el apéndice E), obtenidos mediante la técnica del Ajuste de Espectros en el tiempo (Spectral Matching), partiendo de los espectros de peligro uniforme calculados para Ometepec. Los EPU utilizados corresponden a los calculados para dos relaciones de atenuación del movimiento fuerte del suelo: Youngs *et al.* (1997)) y Atkinson y Boore (2003), para dos periodos de retorno $T_r=45$ años y $T_r=475$ años, considerando dos eventos sísmicos semilla (24 de Octubre de 1993 y 14 de Septiembre de 1995) registrados en dos estaciones cercanas a Ometepec (Copala y Las vigas, pertenecientes al Instituto de Ingeniería de la UNAM). Los espectros elásticos para 5 % de amortiguamiento de los registros sísmicos fueron ajustados iterativamente utilizando Wavelets en el tiempo, hasta encontrar diferencias mínimas con los EPU para los diferentes periodos de retorno (Al Atik y Abrahamson, 2010). Si bien el ajuste de espectros con EPU resulta conservador, se considera una técnica bastante precisa, para casos particulares, cuando se cuenta con una estructura definida, se pueden aplicar espectros condicionales (CMS) (Baker, 2010).

7.2. Conclusiones generales

- Se han descrito y definido las metodologías utilizadas en este estudio para la valoración del peligro sísmico en Ometepec, presentando las bases teóricas y los modelos a seguir.

- Se han estudiado, identificado y caracterizado las diferentes fuentes sísmicas que pueden generar peligro sísmico para la ciudad de Ometepec. Si bien la caracterización de fuentes sísmicas es un trabajo continuo, se ha intentado describir de manera más acertada la sismicidad que afecta la región, apoyándose en estudios sismológicos e informes pasados. Debido a que Ometepec se encuentra muy cercana a la costa del Pacífico, se han identificado fuentes sísmicas de tipo *falla* y de tipo *área*, definidas por modelos finitos.
- Se han identificado y evaluado nueve fuentes sísmicas tipo falla de subducción: Oaxaca Este (OX-E), Oaxaca Central (OX-CI y OX-CII), Oaxaca Oeste (OX-O), Ometepec (OM), Acapulco San Marcos (AC-SM), Guerrero Central (GC), Petatlán (PE) y Michoacán (MI). Se han estudiado también, cinco fuentes tipo área SUB2 y SUB3 para la región de subducción de la costa, IN1 e IN2 para sismos de tipo intraplaca de fallamiento normal, NAM para eventos de tipo somero.
- La tectónica de la región Ometepec se puede definir por tres tipos de sismicidad:
 - a) Zona de Subducción, zona de eventos interplaca someros del tipo de subducción. Convergencia Cocos - NOAM (Interface).
 - b) Zona de eventos intraplaca (Cocos) de profundidad intermedia ($40 \text{ km} < h < 120 \text{ km}$). Relacionados a la interface Cocos-NOAM (Intraslab).
 - c) Zona de eventos intraplaca (NOAM) someros. Aunque no puede hablarse de un tipo de recurrencia formal, debido a que no todos los epicentros de los sismos característicos se han repetido, se tiene un intervalo de recurrencia de movimientos con magnitudes mayores a 7 de aproximadamente 14 ± 3.2 años. Al dividir la zona en tres sectores, agrupados por pares de eventos: 1928-1968, 1937-1982 y 1950-1995, se espera un periodo de retorno de 43.3 ± 2.8 años para cada sector.
- Se estudió, de manera cualitativa, la geología y topografía de la ciudad de Ometepec. Se encontró que el sector Norte de Ometepec, esta formado por Sierra y Lomerío, donde se encuentran principalmente rocas metamórficas (gneis) pertenecientes al Mesozoico, este sector alcanza niveles de 400 a 700 msnm. El sector Sur-Oeste del municipio cuyo relieve predominante es el Lomerio, se encuentra formado por depósitos del Cuaternario con alturas menores 200 msnm por su cercanía a la costa. El valle central y gran parte de la sierra en la parte Sur Este, están formadas por rocas suaves a semi-duras

7.2. CONCLUSIONES GENERALES

de tipo ígnea intrusiva (depósitos del Terciario) con elevaciones de Oeste a Este de 300 msnm a 1000 msnm respectivamente, siendo este sector el que mayores elevaciones presenta en la parte de las montañas al norte de la ciudad, por lo que se entiende que la topografía de la ciudad de Ometepec es suave.

- El tipo de terreno y, en general, la ubicación geográfica de los sismos utilizados para desarrollar las relaciones de atenuación del movimiento fuerte del suelo (GMAR, por sus siglas en inglés), determinan su aplicabilidad a un sitio dado. En este trabajo se utilizaron cinco relaciones de atenuación sísmica, cuatro de ellos definidos en términos de la aceleración espectral del terreno, dos desarrollados a nivel global: Youngs *et al.* (1997) y Atkinson y Boore (2003) y dos desarrollados para México García *et al.* (2005) y Arroyo *et al.* (2010). La quinta relación de atenuación del movimiento fuerte del suelo que permitió obtener la aceleración pico del terreno (PGA), y fue desarrollada para México Gómez-Bernal *et al.* (2012). Todas las relaciones de atenuación estudiadas incluyen en su base de datos registros del estado de Guerrero, que forman parte del catálogo local estudiado en este trabajo. Se ha encontrado que las relaciones de atenuación de Youngs *et al.* (1997) y Atkinson y Boore (2003) permiten calcular Espectros de Peligro Uniforme (EPU) para Ometepec que empatan mejor con la reglamentación vigente, por lo que se concluye que la ecuación de atenuación de Youngs *et al.* (1997) puede utilizarse para calcular EPU en Ometepec y ciudades aledañas obteniendo resultados confiables, mientras que la ecuación de Atkinson y Boore (2003) permite obtener las aceleraciones pico del terreno mas acertadas y conforme a los reglamentos estudiados (CFE, 2008; RCMO, 2009).
- Las contribuciones al peligro sísmico de los eventos tipo intraplaca obtenidos con la relación de atenuación de GA05 y de tipo interplaca, relación de atenuación de ARR10, permiten observar que los EPU obtenidos con la relación de atenuación de Y97 representan la contribución real de ambos tipos de falla, exceptuando para periodos de retorno grandes ($T_r > 475$ años) cuando la ecuación de atenuación de ARR10 presenta aceleraciones espectrales alejadas del resto de los modelos. La relación de atenuación de GO12 permitió comparar los PGA en todos los casos, obteniéndose concordancias

en bajos periodos de retorno ($T_r < 475$ años) para todos los modelos.

- Se obtuvieron los espectros de peligro uniforme (EPU) para la ciudad de Ometepec, para cuatro relaciones de atenuación del movimiento fuerte del suelo que describen los tipos de movimiento recurrentes en la zona; se observó, que los radios de influencia de 500 km se superponen a los de 320 km y 200 km, y los EPU obtenidos con este último caso, en algunos casos, sub-estiman las ordenadas espectrales. Se consideró oportuno trabajar con un radio de influencia de fallas de 320 km, este permitió abarcar las fallas sísmicas más importantes de la región (segmento Ometepec y zonas de subducción). Los EPU en Ometepec que deben utilizarse para análisis sísmicos de estructuras, son los presentados en la figura 6.1, calculados con la relación de atenuación de Youngs *et al.* (1997), entendiéndose que los periodos de retorno de 20 años, 45 años y 100 años deben ser utilizados para estructuras del Grupo B y corresponden a eventos sísmicos leves a moderados; mientras que para estructuras del Grupo A, se debe utilizar el EPU para un periodo de retorno de 475 años, que corresponde a un evento sísmico severo, y para estructuras especiales donde se requiera un nivel sísmico extraordinario se puede recurrir a los EPU para periodos de retorno de 975 años y 2475 años. La elección de EPU depende del nivel de peligro sísmico que se desea aceptar y la definición de objetivos de diseño; la clasificación de estructuras debe ir acorde a la normativa vigente (CFE, 2008; RCMO, 2009).
- Se obtuvieron nuevos parámetros sísmicos para el segmento Ometepec. Se presentaron EPU para diferentes ciudades y puntos cercanos al municipio de Ometepec, definiendo una malla de puntos de interpolación que mediante el Método de Ponderación de distancia inversa (IDW) Shepard (1968), permiten obtener nuevos EPU interpolados para diferentes coordenadas, todo esto con el objetivo de desarrollar una malla de puntos con EPU para todo el territorio mexicano. Mediante 3 modelos de interpolación, se pudieron fijar algunas variables importantes de la metodología: a) las mejores interpolaciones de EPU se obtienen con distancias de puntos de interpolación a sitio de estudio menores o iguales a 30 km; b) es recomendable trabajar con 5 puntos de interpolación como mínimo para obtener errores menores al 6 %; c) el factor de potencia p utilizado en la metodología, puede tomar un valor constante de 2 y permitir

7.2. CONCLUSIONES GENERALES

buenas aproximaciones en todos los casos.

- Con base en un estudio de desagregación del peligro sísmico en términos de la Magnitud sísmica y distancia a la fuente, se han seleccionado dos sismos como eventos semilla para el proceso de Ajuste de Espectros; estos eventos presentan sus focos a distancias menores de 70 km de Ometepec y con magnitudes mayores a 6.4, y corresponden al sismo del 24 de octubre de 1993 y el del 14 de Septiembre de 1995.
- Se obtuvieron siete acelerogramas de sitio para suelo firme de Ometepec, los cuales se presentan en el apéndice E. Tres de estos acelerogramas deben ser utilizados para el análisis sísmico en el tiempo de estructuras pertenecientes al Grupo A, ya que sus espectros de respuesta de aceleración fueron ajustados a EPU que corresponden a periodos de retorno de 475 años, los cuatro acelerogramas de sitio restantes corresponden a estructuras del Grupo B, con espectros de respuesta de aceleración ajustados a EPU para periodos de retorno de 45 años. La metodología de ajuste utilizada fue la desarrollada por Al Atik y Abrahamson (2010), que mediante la introducción de funciones Wavelet, permite ajustar los espectros elásticos de eventos semilla a los EPU, permitió resolver ciertas diferencias entre el espectro objetivo y el espectro del acelerograma semilla; para este proceso se pudieron definir algunos puntos importantes de la metodología:
 - ◆ Fue importante realizar un estudio de desagregación del peligro sísmico, del que se obtuvieron las funciones de densidad de probabilidad condicional conjunta de la magnitud y la distancia a la fuente para periodos de retorno de 45 años y 475 años, para los periodos estructurales de 0.2 s y 0.4 s cuyas intensidades corresponden a los valores máximos de aceleración espectral de los EPU calculados con las relaciones de atenuación de Y97 y AYB03, siendo los valores de aceleración espectral normalizados respecto a la gravedad: 0.84 g, 2.3 g, 0.42 g y 1.17 g, respectivamente. Estos periodos estructurales fueron seleccionados para ejemplificar como diferentes periodos estructurales corresponden a escenarios sísmicos distintos dados en términos de la magnitud y la distancia. Los escenarios sísmicos estudiados permitieron la elección de eventos semilla para

la metodología empleada. Se consideró importante, que los espectros elásticos de los eventos semilla presenten una forma muy parecida a los EPU del sitio en estudio, de manera que los errores (menores al 0.5 %) y las iteraciones del procedimiento se minimizaron, obteniendo un mejor ajuste de espectros.

- ◆ Se encontró que los acelerogramas de sitio, calculados con la técnica del Ajuste de Espectros, presentan un espectro de Fourier cuya forma se mantiene, con algunas variantes, respecto a los eventos reales; luego, el porcentaje de Intensidad de Arias de los acelerogramas reales y ajustados, presentan la misma distribución porcentual en el tiempo; finalmente, la duración de los acelerogramas ajustados para esta técnica, es la misma que la de los eventos semilla; todo esto se cumple, debido a que la técnica del Ajuste de Espectros en el tiempo utilizando Wavelets (Al Atik y Abrahamson, 2010), afecta en porcentajes mínimos el carácter no estacionario de los registros sísmicos semilla, las gráficas de Fourier, porcentajes de intensidad de Arias y los acelerogramas de sitio se presentan en el apéndice E.
- ◆ Se encontró que la elección del mejor espectro para realizar el Ajuste de Espectros con la metodología tratada en este estudio, depende principalmente de la aplicación que tendrá. Un EPU es apropiado si se desea estimar la respuesta de una estructura de manera conservadora y si se desconoce que modos superiores contribuyan sustancialmente a la respuesta de los parámetros de interés. En otros casos es recomendable utilizar un Espectro de Respuesta Condicional (CMS).

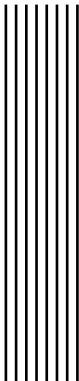
7.3. Trabajos futuros

- Se debe considerar que una refinación en la caracterización de las fuentes sísmicas es un punto clave para obtener resultados más confiables en esta clase de estudios, por lo que el catálogo sísmico utilizado y las características de fuentes sísmicas deben ser revisadas y actualizadas para futuros estudios en la zona.
- Se debe valorar la importancia de los efectos de sitio en la región, con estudios geotécnicos de exploración de suelo.
- Se considera importante que después de realizar estudios geotécnicos en el sitio, para

7.3. TRABAJOS FUTUROS

determinar la estratigrafía y propiedades dinámicas del suelo, se puedan encontrar los EPU y acelerogramas de sitio en los estratos superficiales

- La metodología de interpolación de EPU propuesta en este trabajo, se debe ampliar a más puntos en otras regiones del territorio mexicano, ya que el objetivo de presentar la misma fue el de obtener nuevos parámetros sísmicos en sitios con diferentes coordenadas a partir de sitios con EPU conocidos, y así obtener una malla de puntos para el cálculo de EPU disponible para los ingenieros de la práctica como alternativa a las metodologías existentes.



Bibliografía

- ABRAHAMSON, N., (1992). Non-stationary spectral matching. *Seismological research letters*, vol. 63(1), página 30.
- AL ATIK, L. y ABRAHAMSON, N., (2010). An improved method for nonstationary spectral matching. *Earthquake Spectra*, vol. 26(3), páginas 601–617.
- ARROYO, D., GARCÍA, D., ORDAZ, M., MORA, M. y SINGH, S., (2010). Strong ground-motion relations for mexican interplate earthquakes. *Journal of Seismology*, vol. 14, páginas 769–785. ISSN 1383-4649.
- ASCE, (2010). *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. ASCE/SEI 7-10, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.
- ASTIZ, L. y KANAMORI, H., (1984). An earthquake doublet in Ometepec, Guerrero, Mexico. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, vol. 34, páginas 24–45.
- ATKINSON, G. M. y BOORE, D. M., (2003). Empirical ground-motion relations for subduction-zone earthquakes and their application to cascadia and other regions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 93(4), páginas 1703–1729.
- AY, B. O. y AKKAR, S., (2010). Selecting and scaling of real accelerograms to reduce the scatter in dynamic response. En *9th US National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering*, artículo Nro. 930, Toronto, Canadá.

7.3. TRABAJOS FUTUROS

- BAKER, J., CORNELL, C. y TOTHONG, P., (2005). Disaggregation of seismic drift hazard. En *Proc. 9th International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR05), Rome, Italy*.
- BAKER, J. W., (2010). Conditional mean spectrum: Tool for ground-motion selection. *Journal of Structural Engineering*, vol. 137(3), páginas 322–331.
- BAKER, J. W. y ALLIN CORNELL, C., (2006). Spectral shape, epsilon and record selection. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 35(9), páginas 1077–1095.
- BAKER, J. W. y CORNELL, C. A., (2006). Correlation of response spectral values for multicomponent ground motions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 96(1), páginas 215–227.
- BAKER, J. W. y JAYARAM, N., (2008). Correlation of spectral acceleration values from nga ground motion models. *Earthquake Spectra*, vol. 24(1), páginas 299–317.
- BAZZURRO, P. y CORNELL, C. A., (1999). Disaggregation of seismic hazard. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 89(2), páginas 501–520.
- BAZZURRO, P. y LUCO, N., (2006). Do scaled and spectrum-matched near-source records produce biased nonlinear structural responses? En *Proceedings of the 8th US National Conference on Earthquake Engineering, Paper*, 1029.
- BOORE, D. M., (1983). Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 73(6A), páginas 1865–1894.
- BOORE, D. M., JOYNER, W. B., OLIVER, A. A. y PAGE, R. A., (1980). Peak acceleration, velocity, and displacement from strong-motion records. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 70(1), páginas 305–321.
- BORMANN, P., AKI, K. y LEE, W. H., (2003). Appendix 1 glossary of interest to earthquake and engineering seismologists. En *International Handbook of Earthquake and Engineering*

- Seismology*, vol. 81, Part B de *International Geophysics*, páginas 1793 – 1856. Academic Press.
- CARBALLO, J. E. y CORNELL, C. A., (2000). *Probabilistic seismic demand analysis: Spectrum matching and design*. Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, Report No. RMS-41.
- CFE, (2008). *Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad*. Diseño por Sismo, Instituto de Investigaciones Eléctricas de la CFE.
- CORNELL, C. A., (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 58(5), páginas 1583–1606.
- DOWRICK, D. J., (2009). *Earthquake resistant design and risk reduction*. John Wiley and Sons, Ltd. ISBN 9780470747018.
- DUARTE, R. T. y CAMPOS-COSTA, A., (1992). Non-stationary models of ground motion. En *X Conferencia Mundial de Ingeniería Sísmica, Madrid, España*, vol. 2, páginas 891–894.
- ESTEVA, M. L., (1970). Seismic risk and seismic design decisions. *Journal of Seismic Design for Nuclear Power Plants*, páginas 82–142.
- ESTEVA, M. L. y RUIZ, S., (1989). Seismic failure rates of multistory frames. *Journal of Structural Engineering*, vol. 115(2), páginas 268–284.
- FAHJAN, Y. y OZDEMIR, Z., (2008). Scaling of earthquake accelerograms for non-linear dynamic analyses to match the earthquake design spectra. En *The 14 th World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, Beijing, China*.
- FERNANDEZ, S. L. R., (2012). Propiedades dinámicas del suelos. Curso: Interacción suelo estructura, Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco, México.
- FIGUEROA, J., (1970). Catálogo de sismos ocurridos en la república mexicana. *Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Ingeniería*, vol. 272, página 88.

7.3. TRABAJOS FUTUROS

- GAMA, G. A., (2010). *Estudio de peligro sísmico para la ciudad de Chilpancingo, Guerrero*. Phd, Universidad Autónoma Metropolitana, México.
- GARCÍA, D., SINGH, S. K., HERRÁIZ, M., ORDAZ, M. y PACHECO, J. F., (2005). Inslab earthquakes of central mexico: Peak ground-motion parameters and response spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 95(6), páginas 2272–2282.
- GÓMEZ BERNAL, A., JUÁREZ GARCÍA, H. y CORONA, M., (1999). Peligro sísmico en el valle de chilpancingo, guerrero. En *Memorias XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, vol. 1. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Michoacán, Morelia.
- GÓMEZ BERNAL, A., JUÁREZ GARCÍA, H. y CORONA, M., (2009). Análisis de peligro para la ciudad de chilpancingo, guerrero. En *Memorias XVII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Puebla.
- GÓMEZ-BERNAL, A., LECEA, M. y JUÁREZ-GARCÍA, H., (2012). Empirical attenuation relationship for arias intensity in mexico and their relation with the damage potential. En *15th World Conference on Earthquake Engineering*. Lisboa, Portugal.
- GONZÁLEZ-RUIZ, J. R. y McNALLY, K. C., (1988). Stress accumulation and release since 1882 in ometepec, guerrero, mexico: implications for failure mechanisms and risk assessments of a seismic gap. *Journal of Geophysical Research*, vol. 93(B6), páginas 6297–6317.
- GUTENBERG, B. y RICHTER, C. F., (1944). Frequency of earthquakes in california. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 34(4), páginas 185–188.
- GUTENBERG, B. y RICHTER, C. F., (1956). Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration (second paper). *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 46(2), páginas 105–145.
- HALCHUK, S. y ADAMS, J., (2008). Fourth generation seismic hazard maps of canada: Maps and grid values to be used with the 2005 national building code of canada. Informe técnico, Geological Survey of Canada. Disponible en <http://www.earthquakescanada.nrcan.gc.ca/hazard-alea/interpolat/index-eng.php> (último acceso, Febrero, 2013).

- HERRAIZ, S. M., (1997). Conceptos básicos de sismología para ingenieros.
- IERVOLINO, I. y CORNELL, C. A., (2005). Record selection for nonlinear seismic analysis of structures. *Earthquake Spectra*, vol. 21(3), páginas 685–713.
- IGLESIAS, J., RAMIREZ, M., CARBALLO, J., JARA, M., GUERRERO, J. J., JUÁREZ, H., GÓMEZ-BERNAL, A. y AGUILAR, J., (1993). Zonificación sísmica de ciudades en México. En *Memorias: Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sísmica Resistente, 8 y Primeras Jornadas Andinas de Ingeniería Estructural*, páginas 127–44. Venezuela. Universidad de los Andes. Departamento de Estructuras.
- JAIMES, T. M. A. y REINOSO, A. E., (2001). Peligro sísmico en la ciudad de México debido a sismos de subducción, falla normal e intraplaca. En *Memorias XIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Guadalajara, Jalisco.
- JOYNER, W. B. y BOORE, D. M., (1993). Methods for regression analysis of strong-motion data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 83(2), páginas 469–487.
- JUÁREZ, G. H., GÓMEZ, B. A., RANGEL, N. N. J. L., TENA, C. A., ROLDÁN, I. J. N. y PELCASTRE, P. E., (2012). The march 20, 2012, ometepec, Mexico, earthquake. En *Special Earthquake Report* (editado por S. Nathe), Learning from Earthquakes. EERI.
- KAUL, M. K., (1978). Spectrum-consistent time-history generation. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, vol. 104(4), páginas 781–788.
- KOSTOGLODOV, V. y PACHECO, J., (1999). Cien años de sismicidad en México. *Instituto de Geofísica, UNAM*.
- KRAMER, S. y STEWART, J., (2004). *Earthquake Engineering. From Engineering Seismology to Performance-Based Engineering*, capítulo 4: Geotechnical Aspects of Seismic Hazards. CRC Press. Editado por Bozorgnia, Y. y Bertero, V. V.
- KRAMER, S. L., (1996). Geotechnical earthquake engineering. *Prentice-Hall Civil Engineering and Engineering Mechanics Series, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, c1996*, vol. 1.

7.3. TRABAJOS FUTUROS

- LILHANAND, K. y TSENG, W., (1987). Generation of synthetic time histories compatible with multiple-damping design response spectra. *Proceedings of the 9th Structural Mechanics in Reactor Technology K*, vol. 2, páginas 105–110.
- LOMNITZ, C., (1974). Global tectonics and earthquake risk. *Developments in Geotectonics, Amsterdam: Elsevier*, vol. 1.
- MCGUIRE, R. K., (2001). Deterministic vs. probabilistic earthquake hazards and risks. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 21(5), páginas 377–384.
- MCGUIRE, R. K., (2004). *Seismic hazard and risk analysis*. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA.
- NAEIM, F., ALIMORADI, A. y PEZESHK, S., (2004). Selection and scaling of ground motion time histories for structural design using genetic algorithms. *Earthquake Spectra*, vol. 20(2), páginas 413–426.
- NAEIM, F. y LEW, M., (1995). On the use of the design spectrum compatible time histories. *Earthquake Spectra*, vol. 11(1), páginas 111–127.
- NAVA, A., (1987). Terremotos. XVIII edición, Nro. 34.
- NBCC, (2005). National building code of canada, national research council of canada, nrcc 47666, ottawa.
- NÚÑEZ-CORNÚ, F. J., (1996). A double seismic front and earthquake cycles along the coast of oaxaca, mexico. *Seismological Research Letters*, vol. 67(6), páginas 33–39.
- NISHENKO, S. y SINGH, S., (1987). Conditional probabilities for the recurrence of large and great interplate earthquakes along the mexican subduction zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 77(6), páginas 2095–2114.
- NIST, (2011). Selecting and scaling earthquake ground motions for performing response-history analyses. *NIST GCR 11-917-15, preparado por NEHRP Consultants Joint Venture para el National Institute of Standards and Technology: Redwood City, California*.

- ORDAZ, M., SÁNCHEZ-SESMA, F., SINGH, S. y ROSENBLUETH, E., (1989). Design spectra for mexico's federal district. *Earthquake Spectra*, vol. 5, página 273.
- ORDAZ, S. M., (1992). Riesgo sísmico en México: Lecciones aprendidas del terremoto del 19 de septiembre de 1985. En *1er Congreso Iberoamericano sobre técnicas aplicadas a la gestión de emergencias para la reducción de desastres naturales*. Valencia- España.
- PÉREZ, A., ORDAZ, M. y YAMIN, L., (2005). Método alternativo para el cálculo de espectros de peligro uniforme considerando efectos de sitio (madees). En *Memorias XV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, México.
- RCMO, (2009). Reglamento de construcciones para el municipio de ometepec. H. Ayuntamiento Municipal Constitucional de Ometepec, , Guerrero.
- REINOSO, E. y JAIMES, M. A., (2009). Criterios para obtener acelerogramas de diseño en sitios afectados por varias fuentes sísmicas usando como ejemplo el caso de terreno firme de la ciudad de México. *Revista de Ingeniería Sísmica*, vol. 81, páginas 1–18.
- REITER, L., (1990). *Earthquake hazard analysis: issues and insights*. Columbia University Press.
- RISK-ENGINEERING, (2011). *Ez-Frisk v.7.62, Manual de usuario..* Risk Engineering, Inc., Golden, Colorado, USA.
- SEED, H. B., MURARKA, R., LYSMER, J. y IDRIS, I., (1976). Relationships of maximum acceleration, maximum velocity, distance from source, and local site conditions for moderately strong earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 66(4), páginas 1323–1342.
- SHEPARD, D., (1968). A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. En *Proceedings of the 1968 23rd ACM national conference*, páginas 517–524. ACM.
- SHOME, N., CORNELL, C. A., BAZZURRO, P. y CARBALLO, J. E., (1998). Earthquakes, records, and nonlinear responses. *Earthquake Spectra*, vol. 14(3), páginas 469–500.

BIBLIOGRAFÍA

- SILVA, W. y LEE, K., (1987). Wes rascal code for synthesizing earthquake ground motions: State-of-the-art for assessing earthquake hazards in the united states, report 24. *US Army Engineers Waterways Experiment Station, Misc.*, vol. 73(1).
- SINGH, S., ASTIZ, L. y HAVSKOV, J., (1981). Seismic gaps and recurrence periods of large earthquakes along the mexican subduction zone: a reexamination. *Bulletin of the seismological Society of America*, vol. 71(3), páginas 827–843.
- SORDO, E., GÓMEZ-BERNAL, A., JUÁREZ, H., GARCÍA, GAMA, A., GUINTO, E., WHITNEY, R. A., VERA, R., MENDOZA, E. y ALONSO, G., (1995). The september 14, 1995 ometepec, México, earthquake. En *Special Earthquake Report, Learning from Earthquakes*. EERI.
- THENHAUS, P. C. y CAMPBELL, K. W., (2003). Seismic hazard analysis.
- TRIFUNAC, M. y BRADY, A., (1976). Correlations of peak acceleration, velocity and displacement with earthquake magnitude, distance and site conditions. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 4(5), páginas 455–471.
- WATSON-LAMPREY, J. y ABRAHAMSON, N., (2006). Selection of ground motion time series and limits on scaling. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 26(5), páginas 477–482.
- YOUNGS, R., CHIOU, S.-J., SILVA, W. y HUMPHREY, J., (1997). Strong ground motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes. *Seismological Research Letters*, vol. 68(1), páginas 58–73.
- ZÚÑIGA, R., SUÁREZ, G., ORDAZ, M. y GARCÍA-ACOSTA, V., (1997). Peligro sísmico en latinoamérica y el caribe. *Reporte Final IPGH*. Disponible en <http://www.geociencias.unam.mx/~ramon/seisreg.html> (último acceso, Septiembre, 2012). Capítulo 2: México.

Apéndice A

Probabilidad de excedencia

*Pones tu pie en el camino y si no cuidas tus pasos,
nunca sabes a donde te pueden llevar.*

John Ronald Reuel Tolkien, El Señor de los
Anillos

Un sitio se encuentra localizado en el centro de una zona sísmica homogénea 250 km x 250 km. La relación de recurrencia discreta de la zona está dada por $\log_N(M) = 3 - 0.8 \cdot M$.

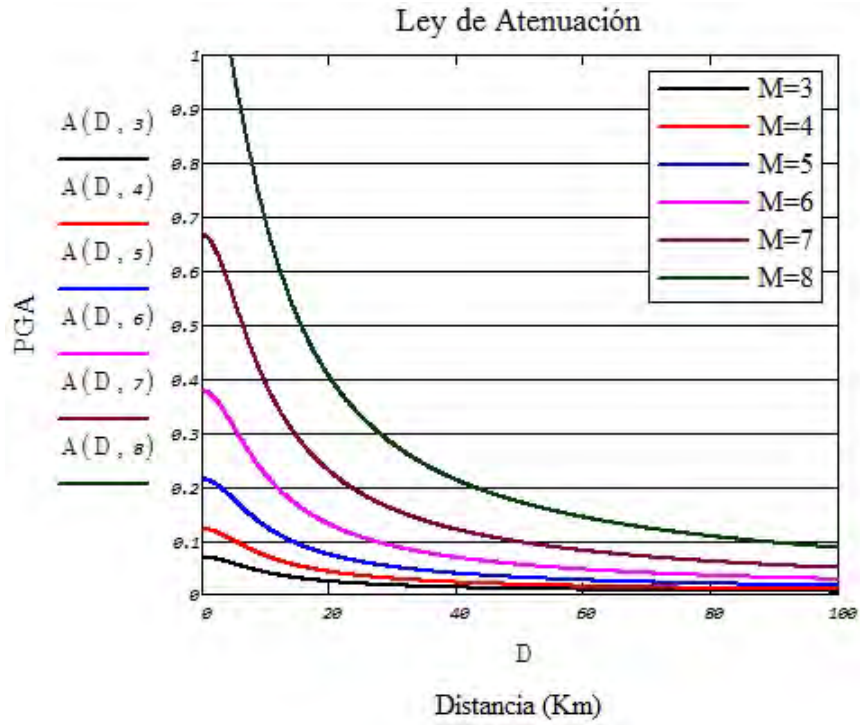
Las discretizaciones se han hecho en intervalos de 1 M (por ejemplo, M=6 incluye todas las magnitudes de 5.5 a 6.5) esta relación define la sismicidad de la zona. Calcule la probabilidad de que un terremoto exceda 0.3g. Para simplificar los cálculos, suponga que la atenuación de PGA está dada por:

$$a = \frac{0.09 \cdot e^{0.57 M}}{R} \quad R = \sqrt{d^2 + 7.3^2}$$

Solución

De la ecuación de atenuación se despeja la distancia epicentral, con $a=0.3g$, que corresponde:

$$R = \frac{0.09 \cdot e^{0.57 M}}{a} \quad \text{Entonces} \quad \frac{0.09 \cdot e^{0.57 M}}{a} = \sqrt{d^2 + 7.3^2}$$
$$d(M, a) = \sqrt{\left(\frac{0.09 \cdot e^{0.57 M}}{a}\right)^2 - 7.3^2} \quad A(D, M) = \frac{0.09 \cdot e^{0.57 M}}{\sqrt{D^2 + 7.3^2}}$$



Para las magnitudes que cruzan la línea de la ordenada = 0.3g, $M = 6, 7, 8$; se tiene:

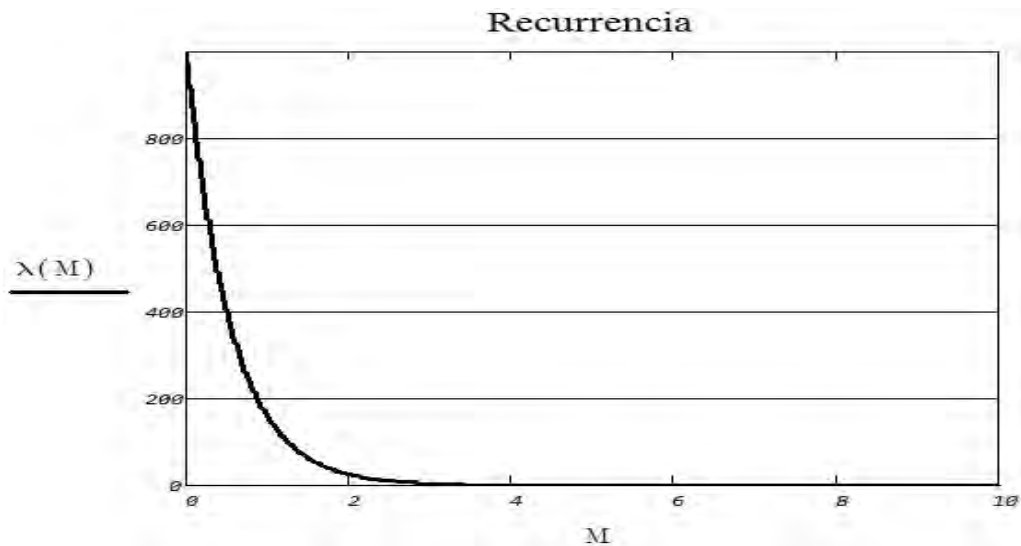
$$d(6, 0.3) \rightarrow 5.551km$$

$$d(7, 0.3) \rightarrow 14.48km$$

$$d(8, 0.3) \rightarrow 27.73km$$

De la ecuación de Recurrencia:

$$\lambda(M) = 10^{3-0.8 \cdot M}$$



Para las diferentes magnitudes:

$$\lambda(6) \longrightarrow 0.015849$$

$$\lambda(7) \longrightarrow 0.002512$$

$$\lambda(8) \longrightarrow 0.000398$$

Realizando los cálculos para el área epicentral:

M	d(km)	A(km ²)	A total (km ²)	N	ΔN
6	5.551	96.80	62500	0.015849	2.45479E-05
7	14.4805	658.74	62500	0.002512	2.64763E-05
8	27.7303	2415.79	62500	0.000398	1.53837E-05

Ahora, ¿cuál es la probabilidad de que un sismo de Magnitud 6 se exceda en 50 años?

Según la relación de Poisson:

$$P = 1 - e^{-\Delta N \cdot t}$$

$$P(\Delta N, t) = 1 - e^{-\Delta N \cdot t}$$

$$P(0.015849, 50) = 0.547$$

$$P = 5.47 \%$$

¿Cuál es la probabilidad de excederse PGA= 0.3 g dada una M = 6?

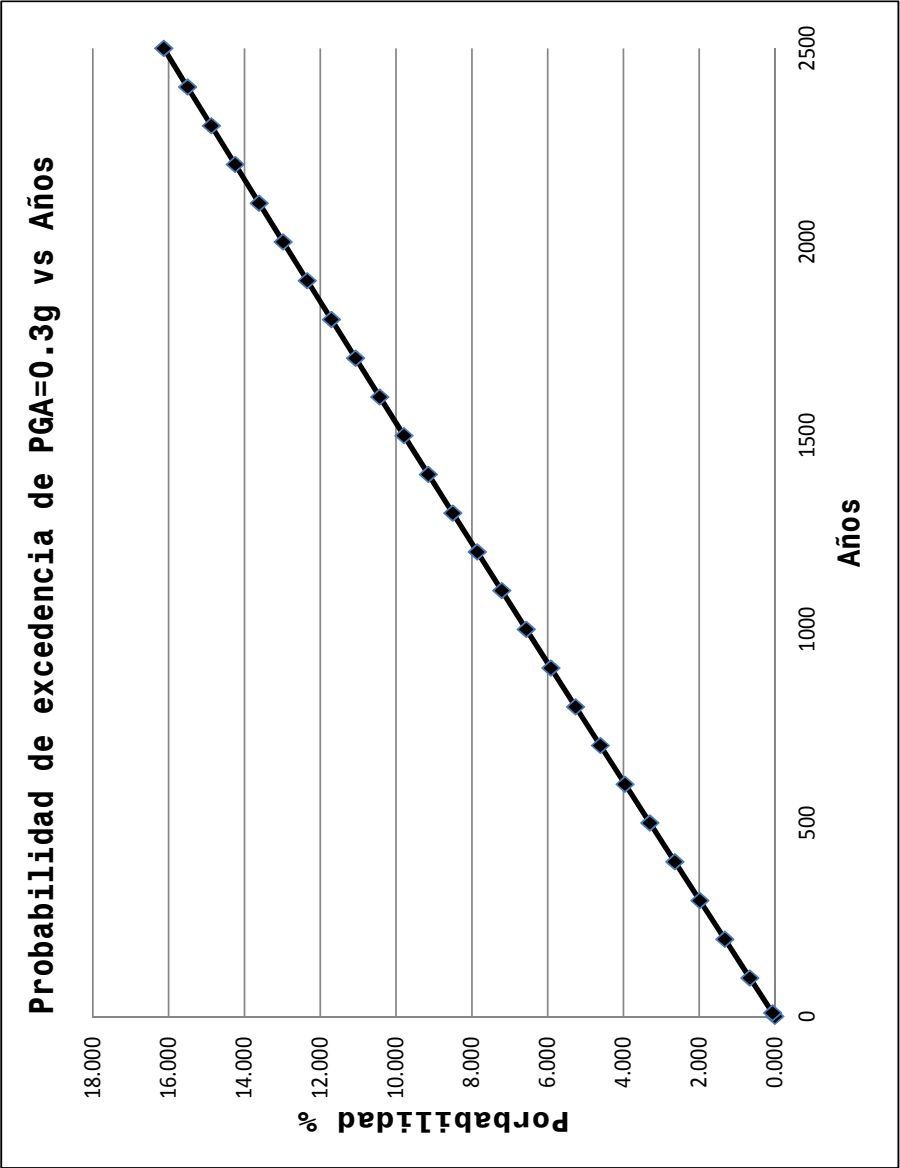
Utilizando un periodo de retorno de t=1 año

$$P(2.45479 \cdot 10^{-5}, 1) = 0.00002455$$

$$P = 0.00245 \%$$

La probabilidad de excedencia de 0.3g vs años

Años	P% (M=6)	P% (M=7)	P% (M=8)	Suma de probabilidad
1	0.002	0.003	0.002	0.007
10	0.025	0.026	0.015	0.066
100	0.245	0.264	0.154	0.663
200	0.490	0.528	0.307	1.325
300	0.734	0.791	0.460	1.985
400	0.977	1.053	0.613	2.644
500	1.220	1.315	0.766	3.301
600	1.462	1.576	0.919	3.957
700	1.704	1.836	1.071	4.611
800	1.945	2.096	1.223	5.264
900	2.185	2.355	1.375	5.915
1000	2.425	2.613	1.527	6.564
1100	2.664	2.870	1.678	7.212
1200	2.903	3.127	1.829	7.859
1300	3.141	3.383	1.980	8.504
1400	3.378	3.639	2.131	9.148
1500	3.615	3.894	2.281	9.790
1600	3.852	4.148	2.431	10.431
1700	4.087	4.401	2.581	11.070
1800	4.322	4.654	2.731	11.707
1900	4.557	4.906	2.881	12.344
2000	4.791	5.158	3.030	12.978
2100	5.024	5.408	3.179	13.612
2200	5.257	5.658	3.328	14.243
2300	5.490	5.908	3.476	14.874
2400	5.721	6.157	3.625	15.503
2500	5.952	6.405	3.773	16.130



Apéndice B

Método de Ponderación de Distancia Inversa (IDW) de Shepard (1968)

El Método de Ponderación de la distancia inversa, IDW (por sus siglas en inglés), se utilizó en este trabajo de investigación para obtener los EPU en ciertas coordenadas, a partir de Espectros de Peligro Uniforme (EPU) conocidos en coordenadas específicas. El método es simple y se describe en este apéndice. Se tienen cuatro sitios con coordenadas conocidas, mostradas en la tabla B.1, y cada punto tiene EPU conocidos:

Nro fuente	Nombre	Latitud	Longitud
1	Azoyú	16.732534	-98.603400
2	Juchitán	16.625453	-98.636383
3	San Juan Cacahuatepec	16.61597	-98.15664
4	Xochistlahuaca	16.791847	-98.242087
5	Cuajinicuilapa	16.469833	-98.413802

Tabla B.1 Ubicación de sitios de estudio

- Se procede a convertir las coordenadas de dos puntos a distancias en kilómetros, para convertir de coordenadas geodésicas a cartográficas se utiliza el elipsoide de referencia WGS-1984 con un radio ecuatorial de 6378 km. Para calcular la distancia entre dos coordenadas conocidas A y B, se utiliza la ecuación (en radianes):

$$Dist[km] = Radio \cdot \{\arccos[\cos(LatB) \cdot \cos(LongB - LongA)] + \sin(LatA) \cdot \sin(LatB)\} \quad (B.1)$$

En este trabajo, se calculó la distancia entre las coordenadas de cada punto mostrado en la tabla B.1 y las coordenadas de Ometepec con Latitud $16.68545^{\circ}N$ y Longitud $98.4054^{\circ}W$. Las distancias calculadas se presentan en la quinta columna de la tabla B.2. Como ejemplo, si obtenemos las coordenadas de Ometepec en radianes se tiene: $LatA = 0.29121$ y $LongA = -1.7175$; luego las coordenadas de Azoyú en

BIBLIOGRAFÍA

radianes: $LatB = 0.29203$ y $LongB = -1.7209$. Aplicando la ecuación B.1, con $Radio = 6378$ km se obtiene la distancia entre los puntos de 21.758 km.

- Se calcula el factor de ponderación de distancia inversa de cada punto i de interpolación según la ecuación B.2, para lo cual se halla el inverso de la distancia de cada punto elevado a una potencia (p) que varía de 2 hasta un valor que depende del grado de aproximación que se requiera, obteniéndose el *peso de cada fuente*, los pesos calculados se presentan en la sexta columna de la tabla B.2.

$$w_i(\chi) = \frac{1}{d(\chi, \chi_i)^p} \quad (B.2)$$

Por ejemplo, para el punto Azoyú (AZ) se tiene:

$$w_1(AZ) = \frac{1}{21.75^4}$$

$$w_1(AZ) = 4.47E - 6$$

Luego se calcula la sumatoria de los pesos, correspondientes a cada punto i de interpolación, y se divide el factor de peso entre la sumatoria de todos los puntos para obtener el *factor de ponderación de distancia* como se define en la ecuación B.3. Los resultados se muestran en la séptima columna de la tabla B.2.

$$Factor_{IDW} = \frac{\sum_{i=0}^N w_i(\chi)}{\sum_{j=0}^N w_j(\chi_j)} \quad (B.3)$$

Para Azoyú se tiene:

$$w_1(AZ) = \frac{4.47E - 6}{1.66311E - 05}$$

$$w_1(AZ) = 0.269$$

Nro	Nombre	LatA(rad)	LongA(rad)	Dist (km)	Wi	Factor _{IDW}
1	AZ	0.292038	-1.720954	21.750	4.47E-06	0.269
2	JU	0.290169	-1.721530	25.522	2.36E-06	0.142
3	SJC	0.290003	-1.713157	27.635	1.71E-06	0.103
4	XO	0.293073	-1.714648	21.056	5.09E-06	0.306
5	CUA	0.287453	-1.717645	24.019	3.00E-06	0.181
				Σ	1.66311E-05	

Tabla B.2 Cálculo del factor de ponderación de distancia inversa para un $p=4$

- Por último, se realiza la interpolación multiplicando el parámetro $u(x)$, en este caso la ordenada espectral del EPU (SA para 5 % de amortiguamiento) en un periodo

determinado, de cada punto i , por su factor de ponderación inversa. Finalmente la aceleración espectral interpolada, es la suma de la contribución de cada punto de interpolación. Los resultados se muestran en la tabla B.3.

$$u_{(x)} = \sum_{i=0}^N Factor_{IDW} \cdot u_i \quad (B.4)$$

Para un periodo de 0.05 s, se tiene:

$$SA_{OM} = 0.269 * 0.845g + 0.142 * 0.9g + 0.103 * 0.958g + 0.306 * 0.796g + 0.181 * 1.002g$$

$$SA_{OM} = 0.878g$$

T (s)	SA (g)					IDW
	AZ	JU	SJC	XO	CUA	
0.05	0.845	0.900	0.958	0.796	1.002	0.878
0.1	1.040	1.098	1.158	0.985	1.207	1.074
0.2	1.104	1.146	1.281	1.097	1.282	1.158
0.3	0.995	1.022	1.168	1.022	1.141	1.051
0.4	0.923	0.945	1.108	0.980	1.066	0.989
0.5	0.814	0.831	1.007	0.860	0.952	0.875
0.75	0.562	0.570	0.698	0.601	0.651	0.605
1	0.426	0.430	0.519	0.458	0.486	0.457
2	0.190	0.191	0.227	0.205	0.213	0.203
3	0.105	0.105	0.123	0.112	0.115	0.111
4	0.079	0.079	0.094	0.085	0.087	0.084

Tabla B.3 Interpolación de aceleraciones espectrales para 5 fuentes, utilizando $p=4$

Apéndice C

Regionalización Sísmica según Zúñiga (1997)

En Zúñiga *et al.* (1997), se ha dividido a México en 19 regiones principales generadoras de sismos. Las 19 regiones sismotectónicas son las siguientes: SUB1, SUB2, SUB3, SUB4, INI1, INI2, INI3, MVB, NAM, BC1, BC2, SMO, BAR, BB, RIV1, RIV2, RIV3, GMX, NAL. Estas fuentes están dictadas por la tectónica del país y por la historia instrumental de sismos registrados. Cada una de estas fuentes genera temblores a una tasa constante por unidad de área.

Se presenta a continuación una descripción de cada región sismotectónica, información obtenida de la publicación realizada por Zúñiga *et al.* en 1997.

1. **Región SUB1:** Zona de eventos interplaca someros del tipo de subducción (profundidad < 40 km). Zona de transición de la convergencia entre placas Rivera y Norteamericana (NOAM) a la convergencia Cocos-NOAM. I
2. **Región SUB2:** Zona de eventos interplaca someros del tipo de subducción. Convergencia Cocos - NOAM.
3. **Región SUB3:** Zona de eventos interplaca someros del tipo de subducción. Convergencia Cocos - NOAM, zona de transición.
4. **Región SUB4:** Zona de eventos interplaca someros del tipo de subducción. Convergencia Cocos - Caribe.
5. **Región IN1** Zona de eventos intraplaca (Cocos) de profundidad intermedia (40 km < h < 120 km). Relacionados a la interface Cocos-NOAM.
6. **Región IN2:** Zona de eventos intraplaca (Cocos) de profundidad intermedia. Relacionados a la zona de transición.

7. **Región IN3** Zona de eventos intraplaca (Cocos) de profundidad intermedia. Relacionados a la interface Cocos-Caribe.
8. **Región MVB:** Zona de eventos intraplaca (NOAM) someros ($h < 40$ km), dentro de la provincia tectónica del Eje Volcánico Mexicano (Mexican Volcanic Belt).
9. **Región NAM:** Zona de eventos intraplaca (NOAM) someros.
10. **Región BC1:** Zona de eventos intraplaca (pacífico), profundidad < 20 km, Península de Baja California.
11. **Región BC2:** Zona de eventos interplaca (pacífico-NOAM), profundidad < 20 km, Península de Baja California.
12. **Región SMO:** Zona de eventos intraplaca (NOAM) someros, provincia Sierra Madre Occidental.
13. **Región BAR:** Zona de eventos intraplaca (NOAM) someros, provincias de Cuencas y Sierras - Fisura del Río Bravo (Basin and Range-Río Grande Rift).
14. **Región BB:** Zona de eventos intraplaca (NOAM) someros, provincia de la Cuenca de Burgos (Burgos Basin).
15. **Región RIV1:** Zona de eventos interplaca someros de fallamiento normal principalmente, interface Pacífico-Rivera.
16. **Región RIV2:** Zona de eventos interplaca someros de fallamiento de rumbo principalmente, interface Pacífico-Rivera.
17. **Región RIV3:** Zona de eventos interplaca de subducción someros. Interface Rivera-NOAM.
18. **Región GMX:** Zona de eventos intraplaca (NOAM) someros. Región del Golfo de México.
19. **Región NAL:** Zona de eventos intraplaca (NOAM) someros de baja magnitud-baja periodicidad.

Apéndice D

Descripción del programa EZ-FRISK™

D.1. Descripción general

La estimación del peligro sísmico en este trabajo se realizó empleando el programa de cómputo EZ-FRISK™ v7.62 desarrollado por Risk Engineering Inc., este programa permite al usuario realizar análisis de Peligro Sísmico, Ajuste de Espectros (*Spectral Matching*) y Análisis de Respuesta de Sitio. Permitiendo resolver una gran variedad de problemas relacionados al peligro sísmico mediante una interfaz gráfica amigable, dando bastantes opciones de modificación de variables al usuario, permitiendo agregar parámetros de análisis para diferentes casos.

El programa se ejecuta en el sistema operativo *Windows*©. En la figura D.1 se muestra la pantalla principal de la aplicación, interfaz que permite la interacción del usuario con el programa. El programa EZ-FRISK™ puede emplearse para estimar el Peligro Sísmico en diferentes regiones del mundo, siempre y cuando se cuente con la base de datos de regiones sísmicas correspondiente so el usuario cuente con la información pertinente, agregue los datos y realice la correcciones necesarias para llevar acabo el análisis que se busca.

D.2. Principales módulos

Los principales módulos del programa permiten tres diferentes tipos de análisis:

- Análisis de Peligro Sísmico.
- Ajuste de espectros (*Spectral Matching*).
- Análisis de Respuesta de Sitio.

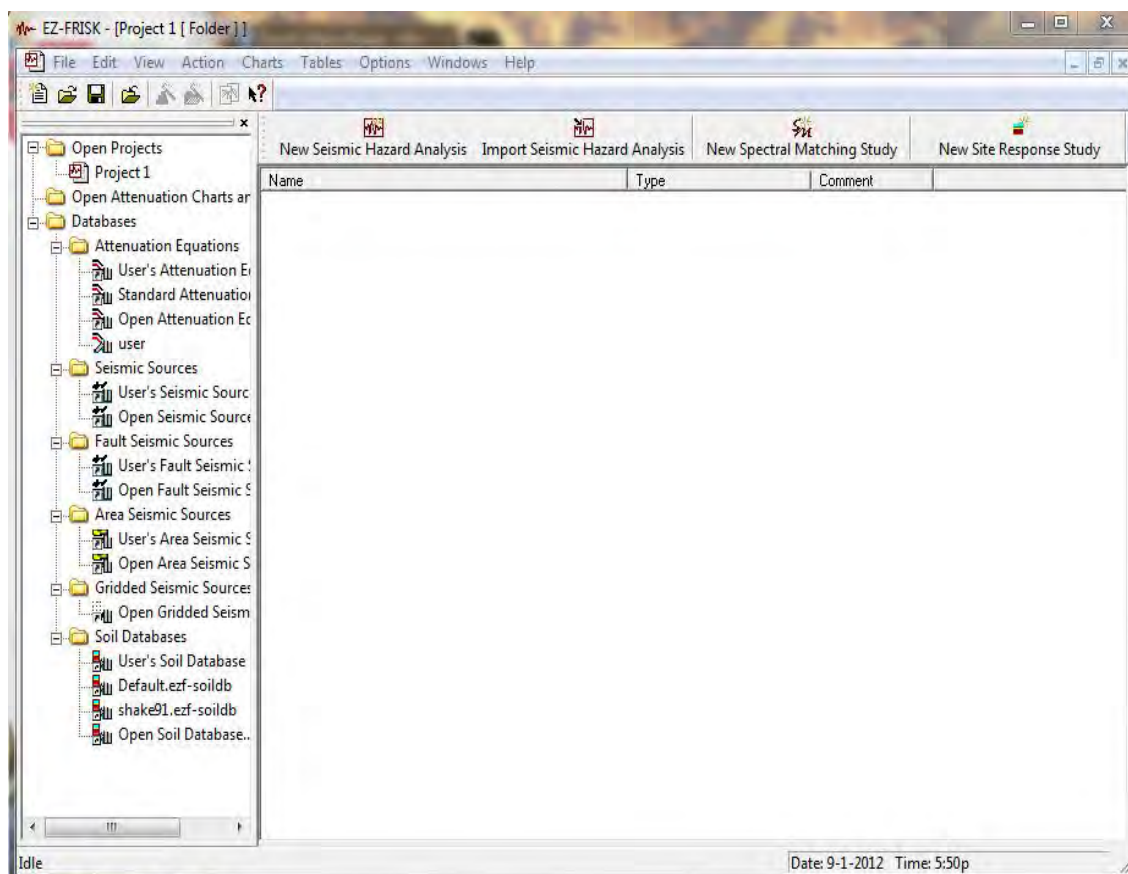


Figura D.1 Pantalla principal del programa EZ-FRISK™ v 7.62

En este trabajo se utilizó el módulo de Peligro Sísmico, el cual permite calcular el peligro sísmico de un sitio bajo ciertos parámetros especificados por el usuario, los cuales se explican en los siguientes títulos. Los parámetros de entrada básicos son: identificar donde ocurrirán los eventos sísmicos, qué características tendrán y qué movimientos sísmicos (por magnitud, distancia al epicentro, etc.) presentarán. Es posible trabajar tanto con análisis probabilista como determinista:

- **Cálculos probabilistas:** Los resultados de los cálculos probabilistas del programa son frecuencias de excedencia anuales para varios niveles de movimiento de terreno para el sitio en interés. El programa realiza también, el cálculo del promedio y las demás distribuciones de magnitud, distancia y epsilon (número de veces la desviación estándar de la ordenada de un espectro con la ordenada de la relación de atenuación utilizada) que causan la excedencia de un nivel específico de movimiento de terreno.
- **Cálculos deterministas:** Los resultados de los cálculos deterministas del programa estiman los movimientos de suelo (para la media y cuartiles especificados por el usuario) que corresponden a la mayor magnitud que puede ocurrir en cada fuente sísmica a la distancia más cercana al sitio.

El análisis de peligro sísmico con EZ-FRISK™ se desarrolla a partir de bases de datos de ecuaciones de atenuación y de fuentes sísmicas que el programa incluye según la región donde se realiza el análisis. Sin embargo, EZ-FRISK™ provee al usuario con herramientas para crear y utilizar sus propias bases de datos.

D.3. Datos

Inicialmente se debe crear un nuevo proyecto, en la barra de herramientas del programa se puede seleccionar el tipo de análisis que se desea realizar. Para un análisis de peligro sísmico se deben ingresar varios parámetros, según los módulos requeridos en la pestaña *View Input* los cuales son:

- Ubicación del sitio (*Site Location*): se debe especificar, en Latitud y Longitud, el sitio donde se realizará el análisis, para varios sitios se realiza un análisis múltiple. Se debe especificar el tipo de parámetro de intensidad, en este estudio se trabajó con un análisis de Respuesta Espectral con 5 % de amortiguamiento. Finalmente, se deben seleccionar los parámetros para el análisis determinista (cuartiles), las amplitudes de aceleración a utilizar en función de la gravedad y los valores de periodo espectrales que se utilizarán. En la figura D.2 se puede observar los datos introducidos para Ometepec.

Figura D.2 Datos introducidos para el análisis de Peligro Sísmico

- Fuentes Sísmicas (*Seismic Sources*): Se deben seleccionar las fuentes sísmicas con las

que se desea trabajar, según la base de datos de la región; es posible también, definir nuevas fuentes sísmicas. En este trabajo se utilizó la regionalización sísmica hecha por Zúñiga *et al.* (1997) y Nishenko y Singh (1987), el programa EZ-FRISK™ incluye la base de datos Mexicana en la que se encuentran definidas las fuentes sísmicas, se realizaron modificaciones a estas (sobre todo en el rango de magnitudes que incluyen eventos recientes y la tasa de recurrencia de las fuentes) para utilizarlas en el análisis. En la figura D.3 se muestran las fuentes sísmicas disponibles.

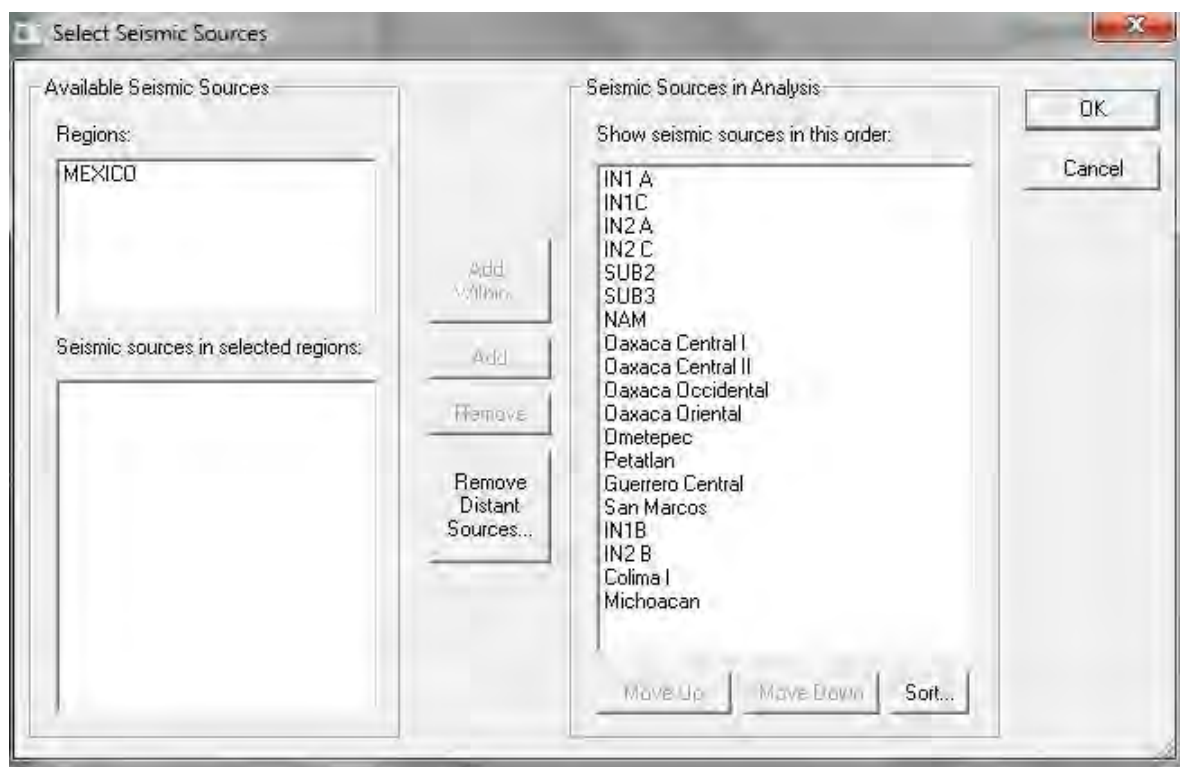


Figura D.3 Fuentes sísmicas para México

Para el análisis de peligro sísmico, la fuentes tipo falla se modelaron considerando la geometría con dos dimensiones: la línea media de la falla en planta (*fault trace*) y por una sección vertical. La línea media de la falla en planta se representa por puntos conectados por segmentos de línea definidos por su latitud y longitud. La sección transversal se caracteriza por dos ángulos (dip 1 y 2) y tres profundidades que especifican la altura mínima de liberación de energía. La sección transversal es constante en toda la falla. La figura D.4 muestra un vista en planta y una sección transversal (A-A) de la falla:

BIBLIOGRAFÍA

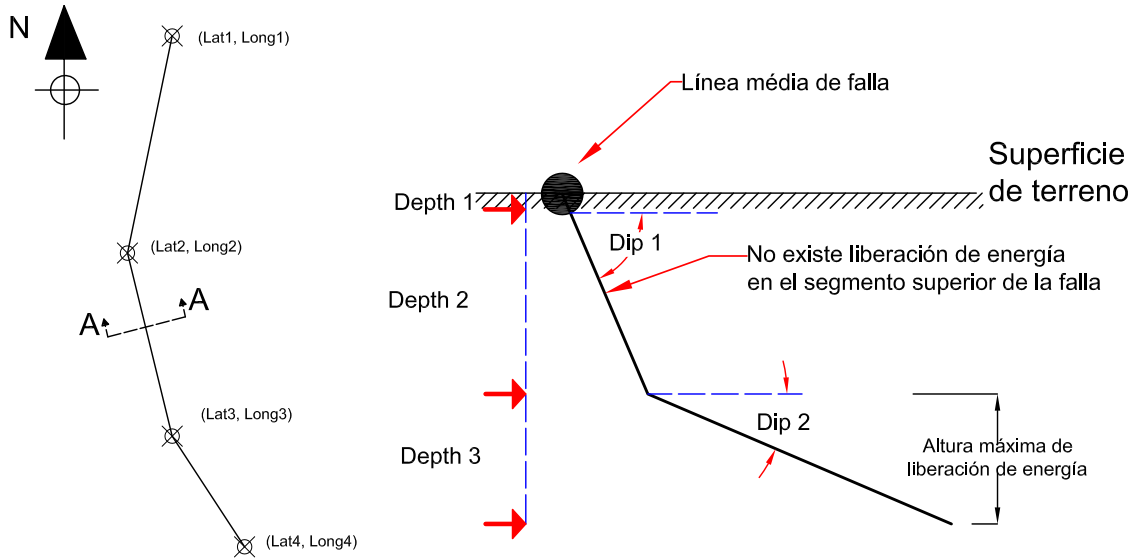


Figura D.4 Geometría de fallas

El cálculo del peligro sísmico para una falla j se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$\lambda_x = v_j \int_m f_{M_j}(m) \int_l f_{L_R}(l) \int_r P[Y > x | m, r] f_{R_j|M_j, L_R}(r, m, l) dr dl dm \quad (D.1)$$

Las integrales sobre m y l (la longitud de ruptura de la falla) se resuelven numéricamente, la integración de r (distancia a la fuente) se realiza sobre los ejes horizontal y vertical de la ruptura.

Las fallas tipo área se analizan como polígonos en el plano horizontal y una profundidad definida por el usuario. Las dimensiones del polígono se definen por puntos unidos por segmentos que deben indicar las coordenadas (latitud y longitud) de la falla. Se asume una distribución uniforme de los sismos dentro el área del polígono. Las distancias de la fuente al sitio se calculan asumiendo que el perfil de la ruptura es vertical, que la superficie de la ruptura esta uniformemente distribuida con la profundidad y que la ruptura se puede modelar como un punto o con longitud finita. La orientación de la ruptura respecto al sitio se modela con diferentes azimuts, en la figura D.5 se tiene una representación gráfica de una fuente tipo área:

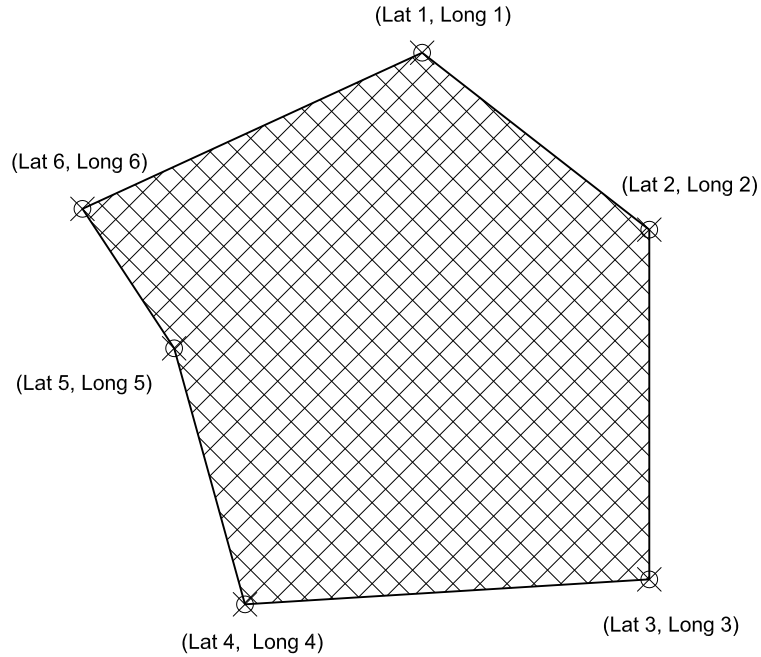


Figura D.5 Geometría de fallas

El cálculo del peligro sísmico para la fuente tipo área j se realiza con la ecuación mostrada a continuación, donde ρ es la distancia horizontal desde el sitio, $arc_j(\rho)$ es la longitud de la intersección entre el polígono de la fuente y un círculo con centro en el sitio y con radio ρ :

$$\lambda_x = v_j \int_{\rho} \frac{arc_j(\rho)}{Area_j} \left[\int_m P[Y > x | m, r(\rho)] f_{M_j}(m) dm \right] d\rho \quad (D.2)$$

$$Area_j = \int_{\rho} arc_j(\rho) d\rho \quad (D.3)$$

- **Ecuaciones de Atenuación (*Seismic Sources*):** Para completar el análisis de Peligro Sísmico deben definirse las ecuaciones o leyes de atenuación que mejor describan el movimiento bajo diferentes parámetros. Para este trabajo, se utilizaron dos ecuaciones de atenuación previamente definidas en la base de datos del programa: Youngs *et al.* (1997) y Atkinson y Boore (2003), tanto para movimientos interplaca como intraplaca y también se introdujeron tres ecuaciones de atenuación mediante los editores que el programa permite utilizar al usuario, basándose en los documentos de García *et al.* (2005) Arroyo *et al.* (2010) y Gómez-Bernal *et al.* (2012). En la figura D.6 se muestran las diferentes ecuaciones de atenuación que el programa incluye en su base de datos.

Para definir nuevas relaciones de atenuación se dispone de dos métodos, el primero es mediante la introducción de código que describa las ecuaciones y variables utilizadas para la relación de atenuación, estas modificaciones se realizan en la ventana de evaluación de ecuaciones (*expression evaluator attenuation equation editor*), donde

BIBLIOGRAFÍA

se definen las variables y condicionantes de cada ecuación; en la figura D.7 se muestra un ejemplo del código utilizado para definir una relación de atenuación y en la figura D.8 se muestran las variables a las que recurre la ecuación, en este caso son los coeficientes C1 a C5 y el logaritmo de la desviación estándar. El segundo método, consiste en introducir en una base de datos (en formato de tabla) los valores del parámetro sísmico a utilizar para diferentes periodos y magnitudes, en este ejemplo se introdujeron valores del logaritmo natural de la aceleración espectral (SA) para diferentes periodos, magnitudes y distancias a la fuente (R), la figura D.9 muestra la tabla de datos para un periodo de 0.3 s.

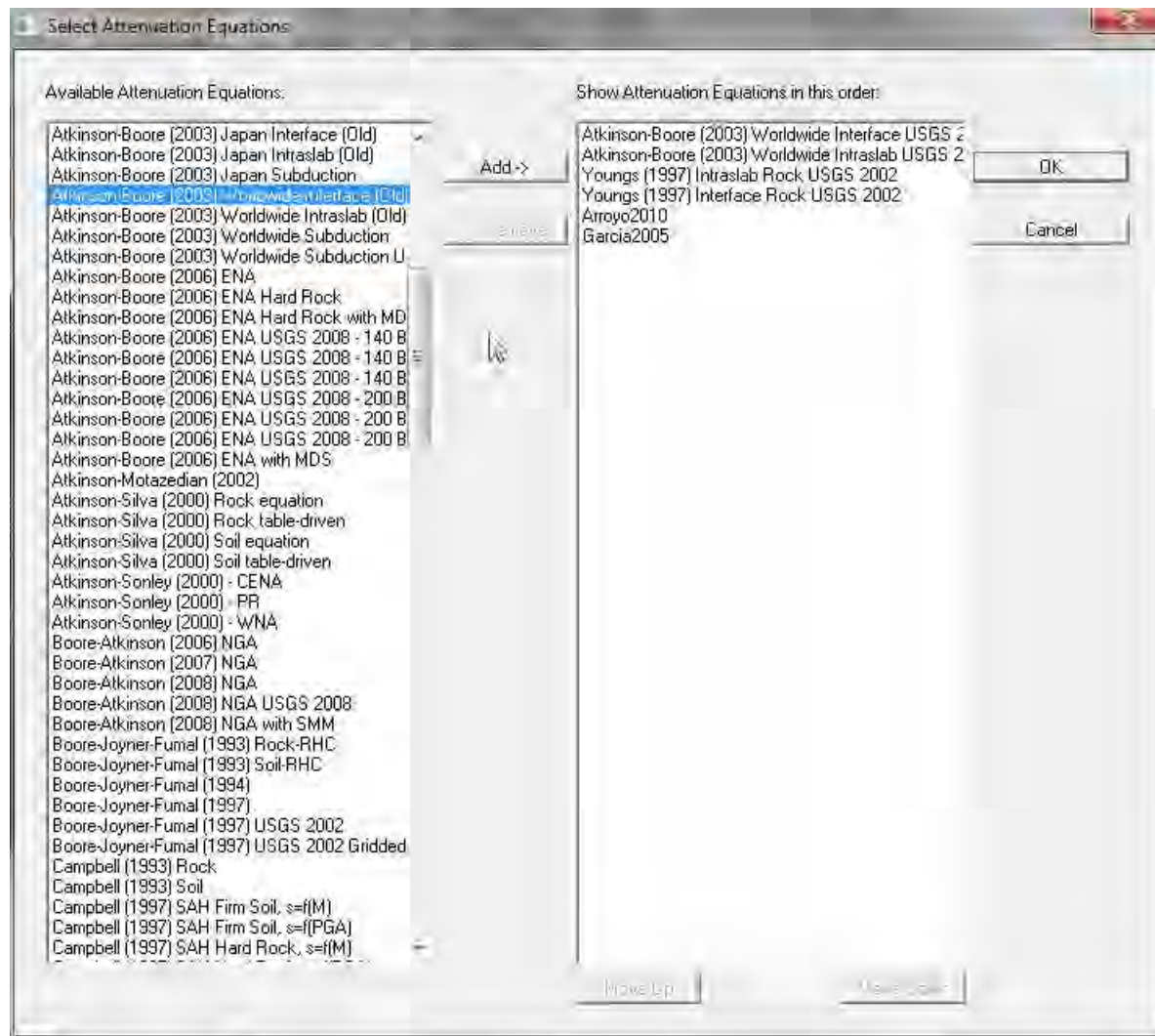


Figura D.6 Leyes de atenuación para diferentes regiones del mundo

Expression Evaluator Attenuation Equation Editor

Formula | Site Parameters | Equation Parameters | Coefficients

The formula must assign values to $\ln Y$ and $\sigma_{\ln Y}$, based on rupture metrics, site parameters, equation parameters and coefficients, and intrinsic functions.

```

delta=0.00750*10^(0.507*Mw);
R = (Rcl^2 + delta^2)^(0.5);

lnY = (c1 + c2 * Mw + c3 * R - c4 * log(R) + c5 * Zcof + sigma_total)*ln(10)) - ln(981);
sigmaLnY= sigma_total;

```

Validate

Rupture Metrics: Dip - The dip angle in degrees of the rupture surface. If the angle is less than 90 degrees. Insert

Site Parameters: Vs30 (m/s) - Shear wave velocity averaged over top 30 m. Insert

Equation Parameters: Insert

Equation Coefficients (vary by spectral period): c1. Insert

Functions: acos. Insert

Constants: e. Insert

Aceptar Cancelar Aplicar Ayuda

Figura D.7 Introducción de una relación de atenuación mediante código.

COEFFICIENTS - Units of Acceleration [g]									
	Period	Fault Mechanism	c1	c2	c3	c4	c5	sigma_total	
1	PGA	Area	-0.2	0.59	-0.0039	1	0.008	0.28	
2	0.04	Area	0.03	0.59	-0.0043	1	0.007	0.32	
3	0.05	Area	0.1	0.58	-0.0043	1	0.008	0.34	
4	0.075	Area	0.2	0.57	-0.0043	1	0.008	0.34	
5	0.1	Area	0.4	0.55	-0.0041	1	0.008	0.33	
6	0.2	Area	0.05	0.59	-0.0037	1	0.007	0.28	
7	0.3003	Area	-0.3	0.63	-0.0033	1	0.005	0.28	
8	0.4	Area	-0.6	0.64	-0.0028	1	0.005	0.27	
9	0.5	Area	-0.8	0.67	-0.0024	1	0.004	0.26	
10	0.7519	Area	-1.3	0.71	-0.002	1	0.004	0.27	
11	1	Area	-1.7	0.75	-0.0017	1	0.003	0.28	
12	1.4925	Area	-2.3	0.81	-0.0014	1	0.002	0.28	
13	2	Area	-2.7	0.85	-0.0012	1	0.001	0.26	
14	3.0303	Area	-3.3	0.89	-0.0009	1	0.0009	0.26	
15	4	Area	-3.9	0.94	-0.0008	1	0.0009	0.25	
16	5	Area	-4.3	0.97	-0.0007	1	0.001	0.25	

Figura D.8 Parámetros de la relación de atenuación definida mediante código.

COEFFICIENTS - Units of Acceleration (g) Import Table...

Intensity Type: Spectral Response @ 5'

Amplitude Units: Acceleration (g)

Periods: 0.2, 0.3, 0.4

Fault Mechanisms: All Sources

	Magnitudes	Distances	Amplitude	Sigma(ln(Y))				
	A	B	C	D	E	F	G	
1		Magnitude	4	4.2	4.4	4.6	4.8	
2	R, km	log(R)						
3	1.00	0.0000	1.830E-01	2.246E-01	2.736E-01	3.300E-01	3.932E-01	
4	2.00	0.3010	1.025E-01	1.273E-01	1.577E-01	1.946E-01	2.388E-01	
5	3.00	0.4771	7.228E-02	8.995E-02	1.118E-01	1.387E-01	1.717E-01	
6	5.00	0.6990	4.615E-02	5.751E-02	7.163E-02	8.915E-02	1.109E-01	
7	10.00	1.0000	2.469E-02	3.078E-02	3.837E-02	4.783E-02	5.960E-02	
8	15.00	1.1761	1.689E-02	2.106E-02	2.626E-02	3.274E-02	4.081E-02	
9	20.00	1.3010	1.278E-02	1.594E-02	1.987E-02	2.478E-02	3.089E-02	
10	30.00	1.4771	8.466E-03	1.056E-02	1.316E-02	1.642E-02	2.047E-02	
11	50.00	1.6990	4.804E-03	5.991E-03	7.471E-03	9.316E-03	1.162E-02	
12	70.00	1.8451	3.166E-03	3.948E-03	4.923E-03	6.139E-03	7.655E-03	
13	100.00	2.0000	1.923E-03	2.398E-03	2.990E-03	3.728E-03	4.649E-03	
14	120.00	2.0792	1.446E-03	1.803E-03	2.249E-03	2.804E-03	3.497E-03	
15	150.00	2.1761	9.847E-04	1.228E-03	1.531E-03	1.909E-03	2.381E-03	
16	200.00	2.3010	5.679E-04	6.957E-04	8.675E-04	1.082E-03	1.349E-03	

Figura D.9 Introducción de una relación de atenuación mediante base de datos (formato de tabular).

- Parámetros de cálculo (*Seismic Sources*): se define qué ley de atenuación se aplica a las diferentes fuentes sísmicas seleccionadas. Luego, se especifican algunos parámetros de cálculo como: la distancia máxima de inclusión en el análisis, la discretización de distancias horizontal como vertical, todo ello tanto para fallas como para fuentes tipo área. Por último, se debe realizar la validación y análisis del modelo y revisar los resultados obtenidos.

D.4. Resultados

Los resultados del análisis pueden observarse en forma de gráficas para ciertos parámetros o en forma de tablas de resultados generales. Los resultados principales de un análisis de peligro sísmico comprenden:

- Curvas de peligro sísmico, cuyas ordenadas contienen información de la tasa de excedencia anual y las abscisas muestran una cierta aceleración en función de la gravedad, para cada periodo que se quiera analizar, inicialmente se calcula para cada ecuación de atenuación definida y luego se halla el promedio de los resultados.
- Tasa de actividad de cada fuente sísmica: Para cada fuente sísmica definida se debe conocer la tasa anual de recurrencia para una rango de magnitudes definido. Los resultados que se obtienen son gráficos que muestran el número de eventos esperados mayores a una magnitud esperada M en un año para todas las fuentes en el análisis. Es una representación del valor b de Richter y está basado en los parámetros definidos por cada fuente.
- Contribución de cada fuente al peligro: se obtienen curvas de peligro sísmico de cada fuente, para cada ecuación de atenuación y variando también los periodos, así es posible

conocer la contribución al peligro sísmico del sitio que cada fuente sísmica llega a tener.

- Espectros de Peligro Uniforme: son uno de los resultados más importantes obtenidos, representan una envolvente de muchos resultados, para una cierta probabilidad uniforme o periodo de retorno asignado, de las curvas de peligro obtenidas con anterioridad, se obtienen las aceleraciones espectrales que varían con cada periodo estudiado.
- Curvas de peligro sísmico determinista: la curva de peligro determinista para un determinado cuartil o cuartiles definidos en la introducción de datos, muestra las aceleraciones espectrales en función de los periodos. En los resultados también se indican las magnitudes y distancias usadas para cada fuente sísmica
- Desagregación del peligro sísmico: en forma de gráficas 2D y 3D o tabulares, se muestra la contribución en función de probabilidad para ciertos parámetros de un evento sísmico (distancia y aceleración espectral).

Apéndice E

Acelerogramas de sitio mediante la técnica del Ajuste de Espectros

E.1. Desagregación del peligro sísmico

En el capítulo 6 se describió el procedimiento de desagregación del peligro sísmico realizado para aplicar la técnica del Ajuste de Espectros (*Spectral Matching*) y obtener acelerogramas de sitio; en este apéndice se presentan las gráficas de desagregación para magnitud y distancia para cuatro ecuaciones de atenuación, con $T_r=45$ años y $T_r=475$ años de periodo de retorno.

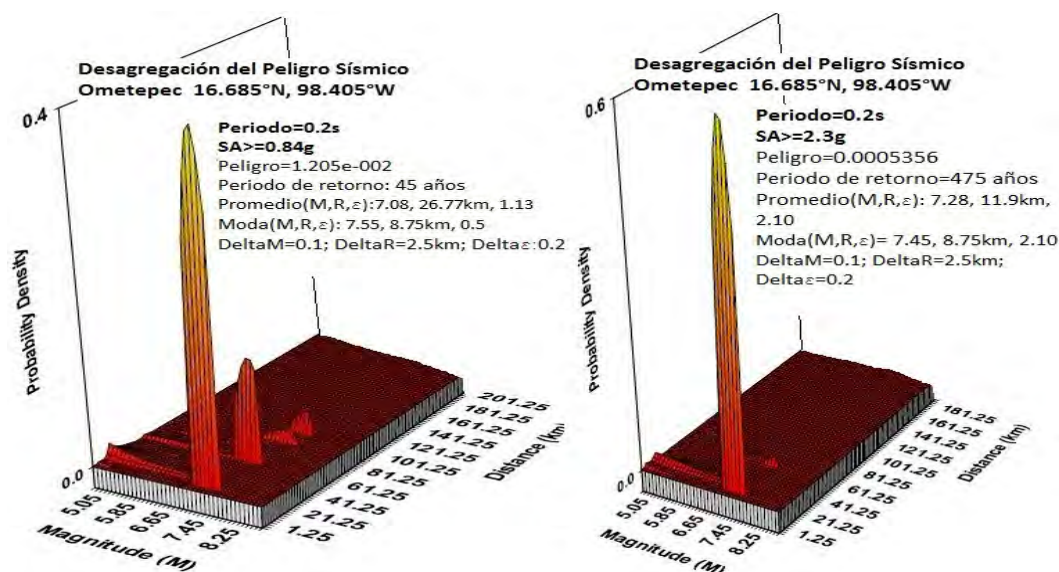
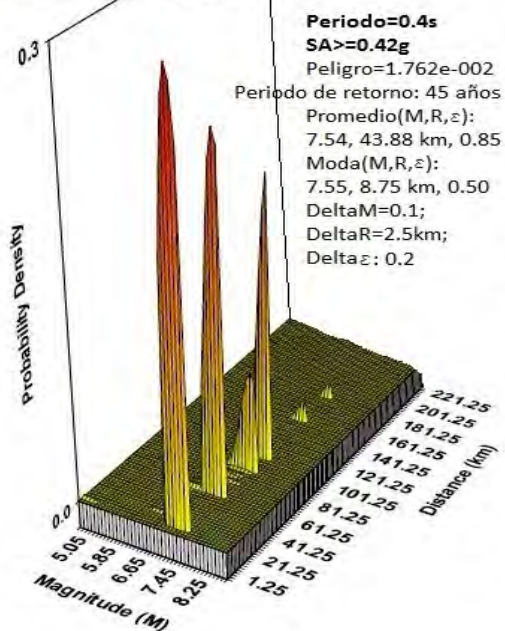


Figura E.1 Desagregación para $T_r=45$ años (Izq.) y $T_r=475$ años (Der.), con Y97.

Desagregación del Peligro Sísmico
Ometepec 16.685°N, 98.405°W
Atkinson y Boore (2003)



Desagregación del Peligro Sísmico
Ometepec 16.685°N, 98.405°W
Atkinson y Boore (2003)

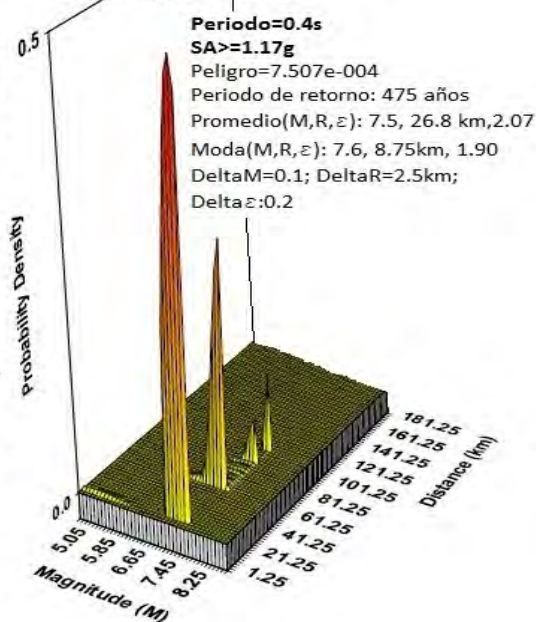
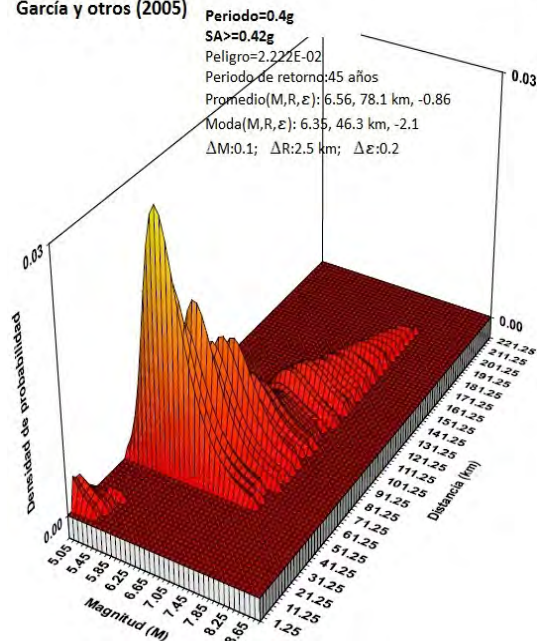


Figura E.2 Desagregación para $T_r=45$ años (Izq.) y $T_r=475$ años (Der.), con AYB03.

Desagregación del Peligro Sísmico
Ometec 16.685°N, 98.405°W
García y otros (2005)



Desagregación del Peligro sísmico
Ometec 16.685°N, 98.405°W
García y otros (2005)

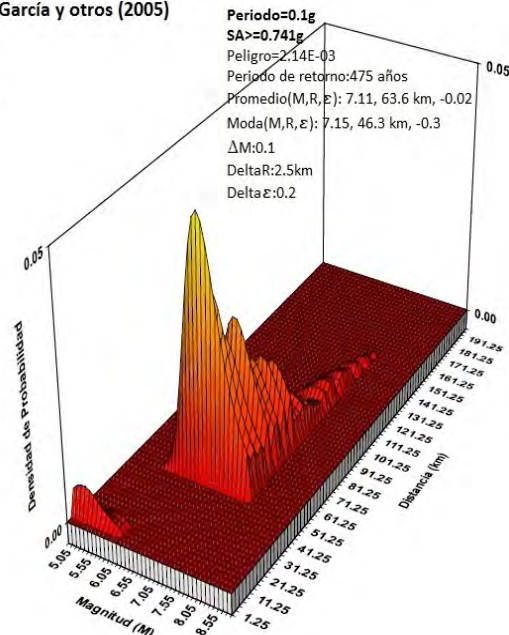


Figura E.3 Desagregación para $T_r=45$ años (Izq.) y $T_r=475$ años (Der.), con GA05

BIBLIOGRAFÍA

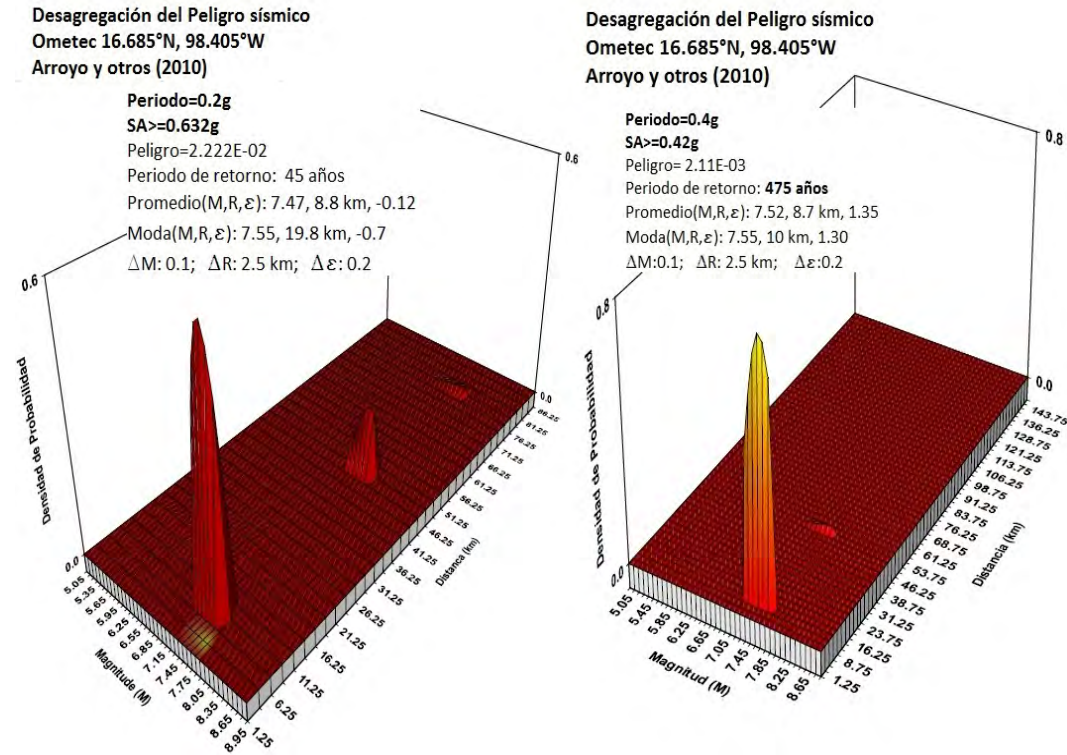


Figura E.4 Desagregación para $T_r=45$ años (Izq.) y $T_r=475$ años (Der.), con ARR10

E.2. Acelerogramas de diseño

Se presenta los acelerogramas semilla y los acelerogramas de sitio calculados con la técnica del ajuste de espectros de peligro uniforme.

E.2.1. Acelerogramas semilla

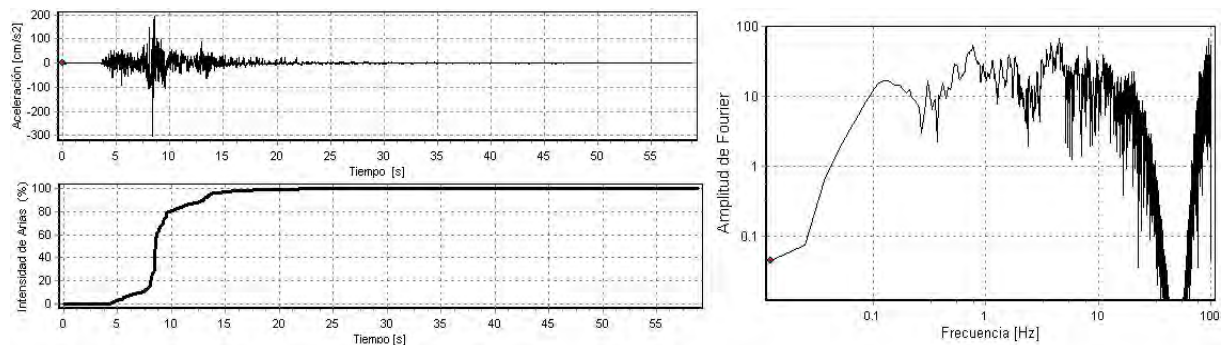


Figura E.5 Acelerograma, porcentaje de intensidad de Arias y espectro de Fourier del evento semilla del 24-Oct-1993, registrado en la estación Copala dirección N90°E

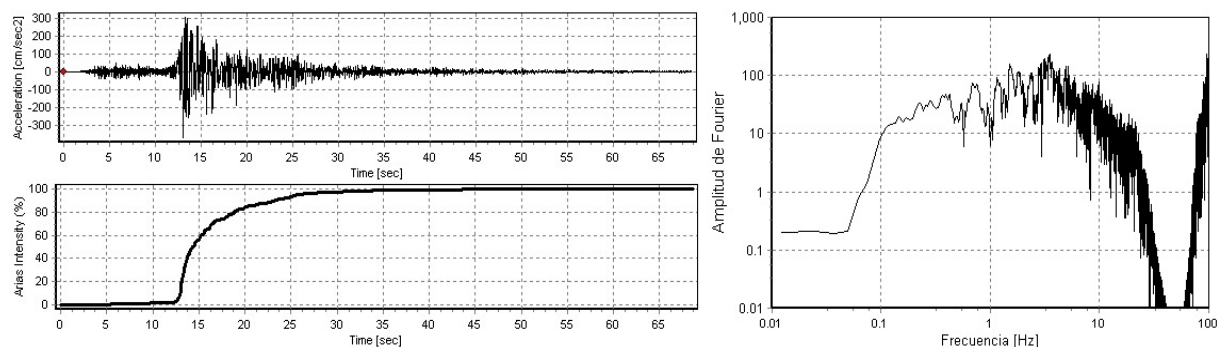


Figura E.6 Acelerograma, porcentaje de intensidad de Arias y espectro de Fourier del evento semilla del 24-Oct-1993, registrado en la estación Las Vigas dirección S90°E

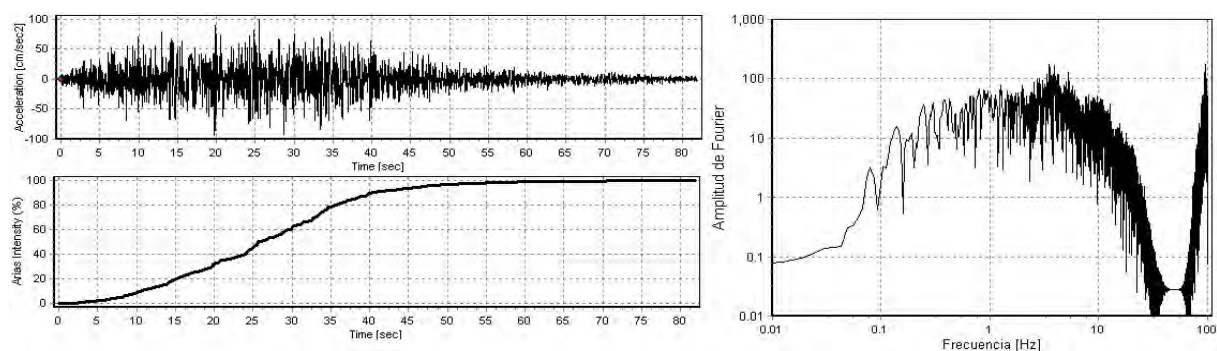


Figura E.7 Acelerograma, porcentaje de intensidad de Arias y espectro de Fourier del evento semilla del 14-Sep-1995, registrado en la estación Las Vigas dirección S0°E

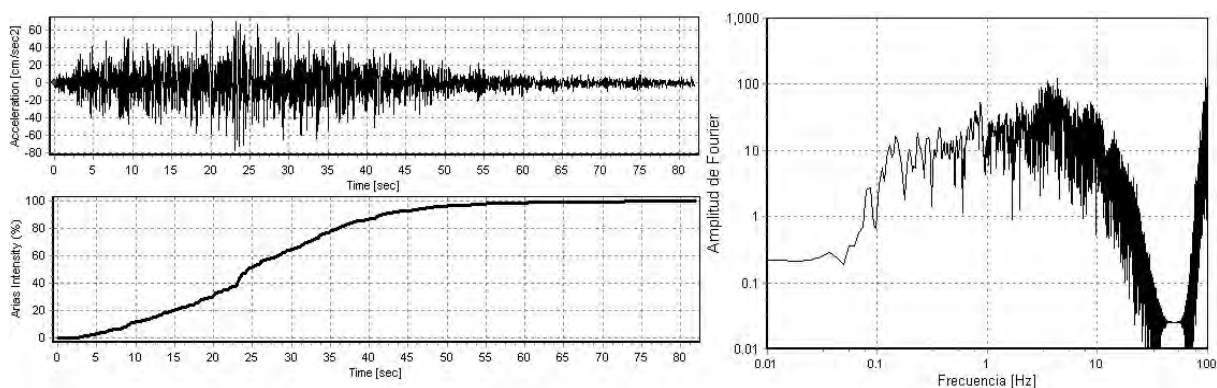


Figura E.8 Acelerograma, porcentaje de intensidad de Arias y espectro de Fourier del evento semilla del 14-Sep-1995, registrado en la estación Las Vigas dirección S90°E

E.2.2. Acelerogramas resultado del Ajuste de Espectros

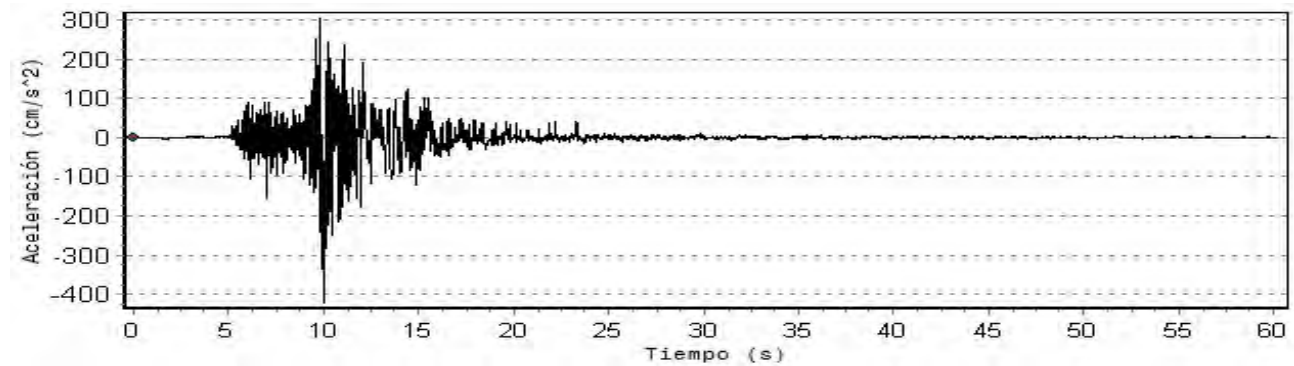


Figura E.9 Acelerograma resultado del ajuste del EPU de Y97 con el espectro del evento CO93-N90°E, para $T_r=45$ años.

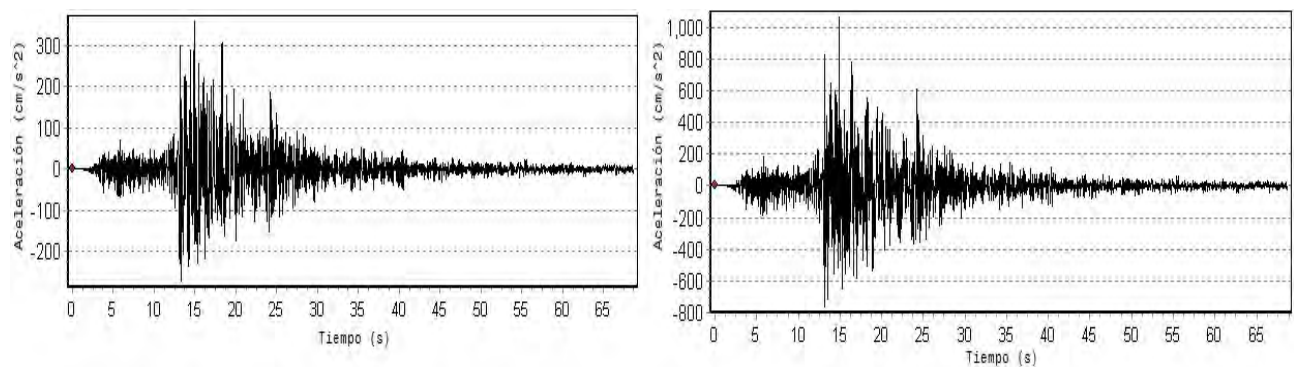


Figura E.10 Acelerogramas resultado del ajuste del EPU de Y97 con el espectro del evento VI93-S90°E, para $T_r=45$ años (izq.) y $T_r=475$ años (der.).

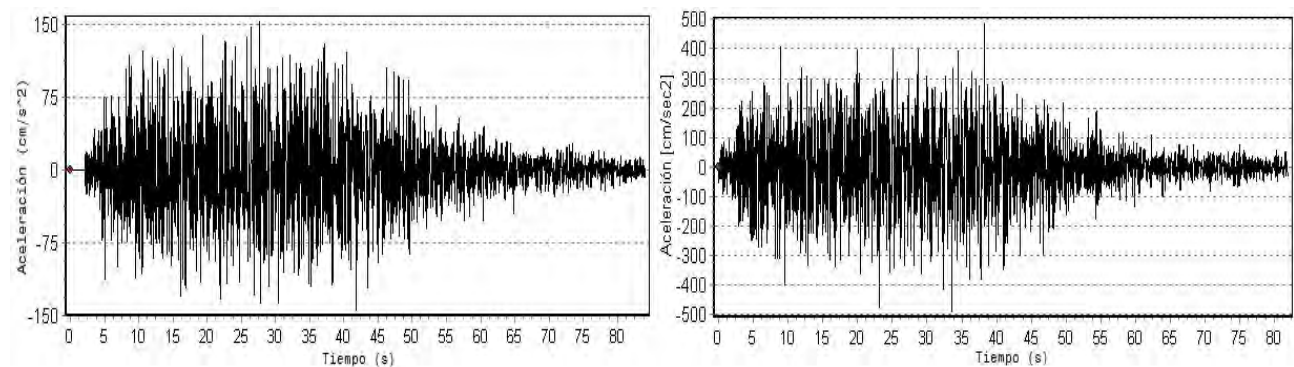


Figura E.11 Acelerograma resultado del ajuste del EPU de AYB03 con el espectro del evento VI95-S0°E, para $T_r=45$ años (izq.) y $T_r=475$ años (der.).

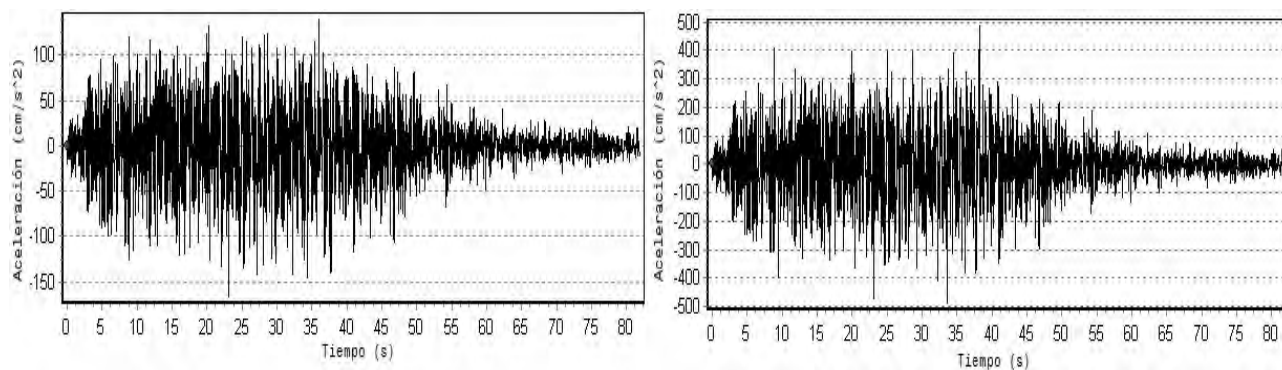


Figura E.12 Acelerograma resultado del ajuste del EPU de AYB03 con el espectro del evento VI95-S90°E, para $T_r=45$ años (izq.) y $T_r=475$ años (der.).

E.2.3. Espectros de Fourier de los acelerogramas obtenidos

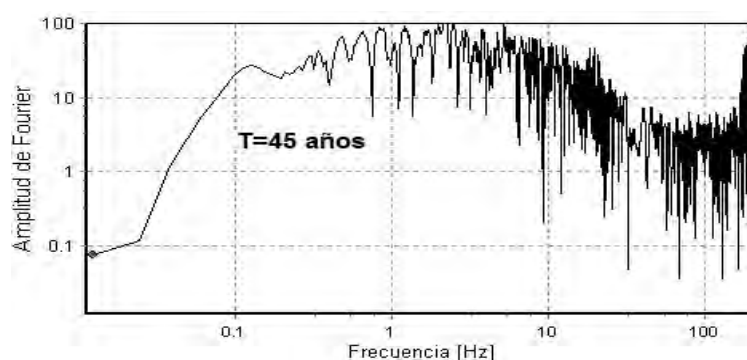


Figura E.13 Espectros de Fourier de los acelerogramas resultado del ajuste del EPU de Y97 con el espectro del evento CO93-N90°E, para $T_r=45$ años.

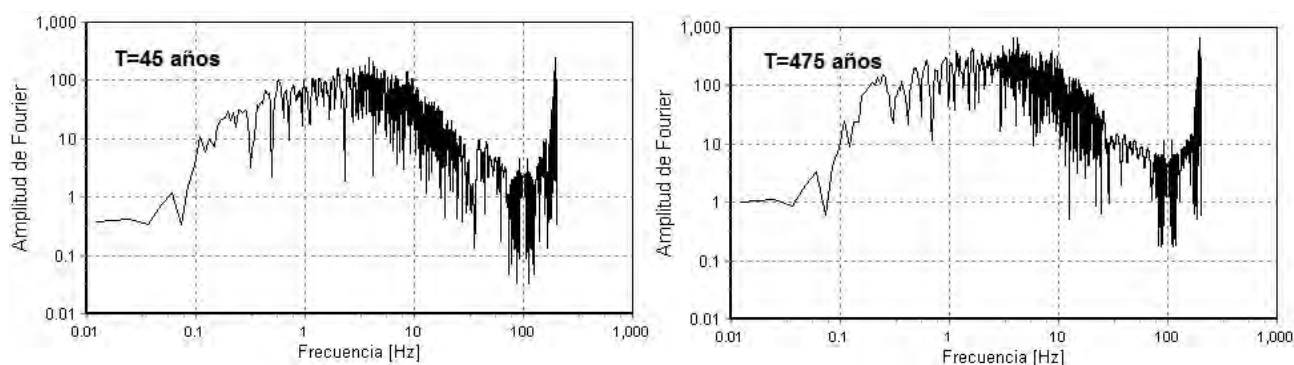


Figura E.14 Espectros de Fourier de los acelerogramas resultado del ajuste del EPU de Y97 con el espectro del evento VI93-S90°E, para $T_r=45$ años (izq.) y $T_r=475$ años (der.).

BIBLIOGRAFÍA

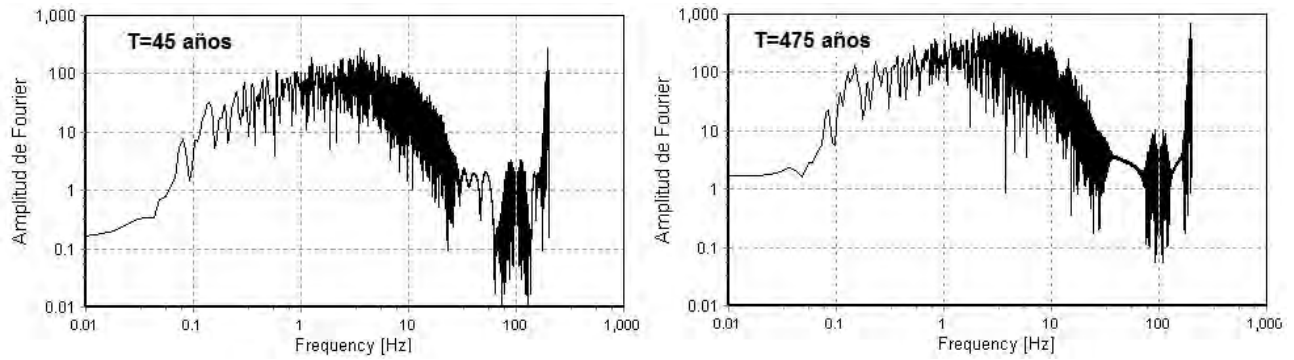


Figura E.15 Espectros de Fourier de los acelerogramas resultado del ajuste del EPU de AYB03 con el espectro del evento VI95-S0°E, para $Tr=45$ años (izq.) y $Tr=475$ años (der.).

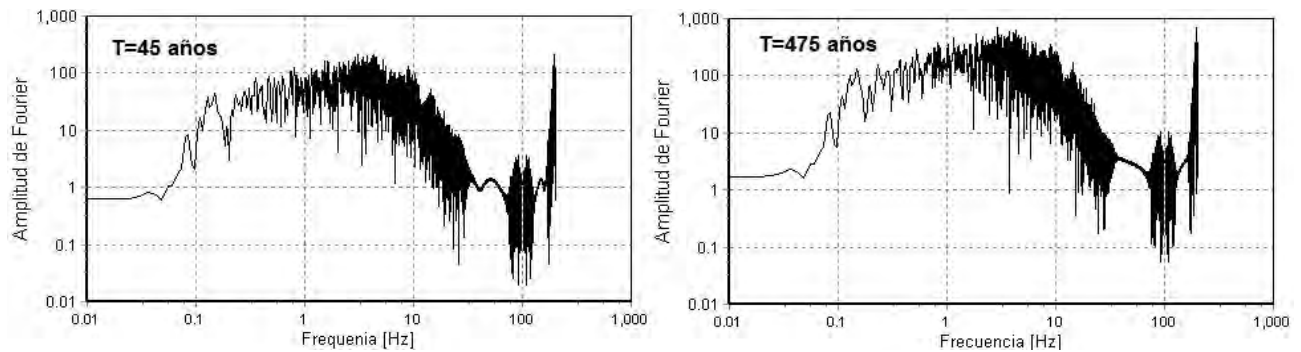


Figura E.16 Espectros de Fourier de los acelerogramas resultado del ajuste del EPU de AYB03 con el espectro del evento VI95-S90°E, para $Tr=45$ años (izq.) y $Tr=475$ años (der.).

E.2.4. Curvas de porcentaje de intensidad de Arias

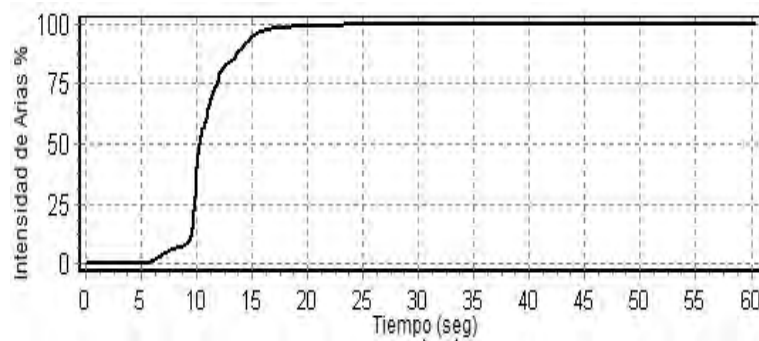


Figura E.17 Porcentaje de intensidad de Arias para los acelerogramas resultado del ajuste del EPU de Y97 con el espectro del evento CO93-N90°E, para $Tr=45$ años.

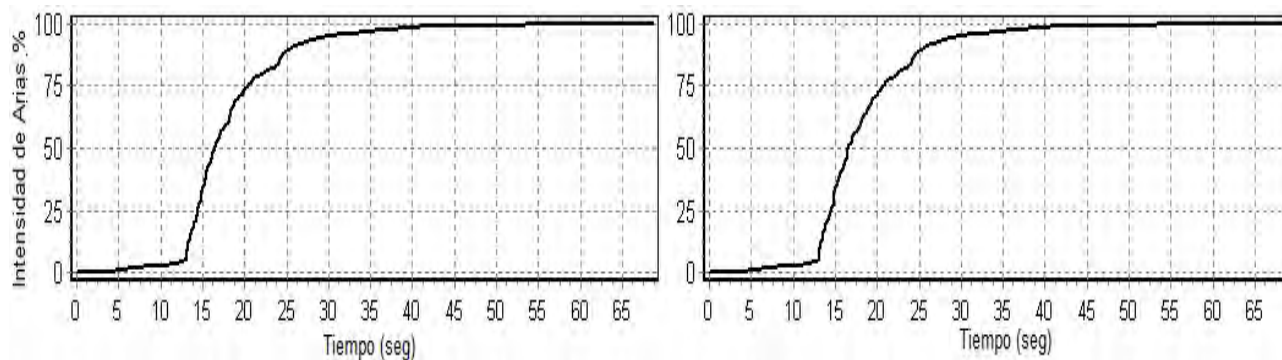


Figura E.18 Porcentaje de intensidad de Arias para los acelerogramas resultado del ajuste del EPU de Y97 con el espectro del evento VI93-S90°E, para $Tr=45$ años (izq.) y $Tr=475$ años (der.).

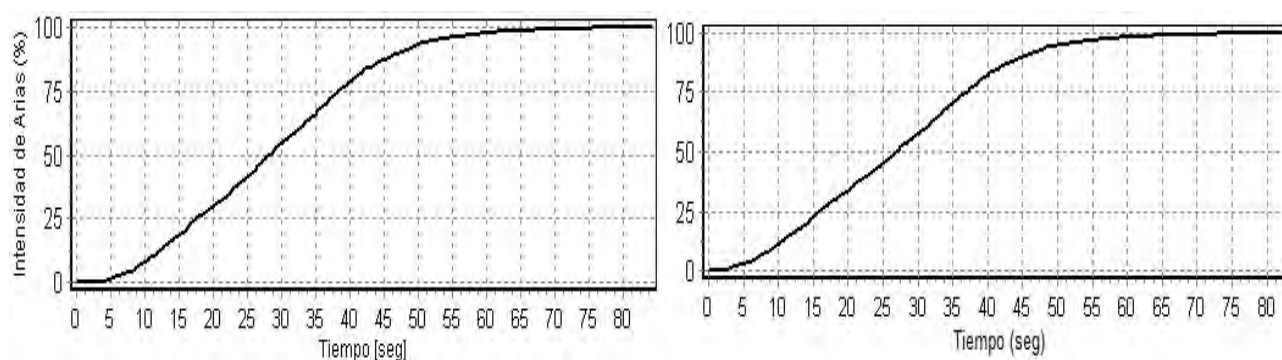


Figura E.19 Porcentaje de intensidad de Arias para los acelerogramas resultado del ajuste del EPU de AYB03 con el espectro del evento VI95-S0°E, para $Tr=45$ años (izq.) y $Tr=475$ años (der.).

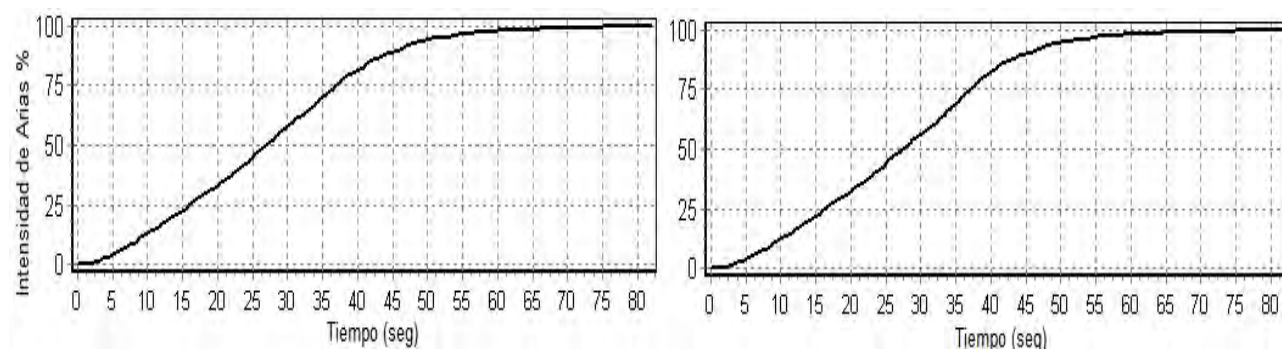


Figura E.20 Porcentaje de intensidad de Arias para los acelerogramas resultado del ajuste del EPU de AYB03 con el espectro del evento VI95-S90°E, para $Tr=45$ años (izq.) y $Tr=475$ años (der.).

E.2.5. Comparación de EPU obtenidos con la técnica del Ajuste de Espectros (Spectral Matching) y espectros de eventos semilla

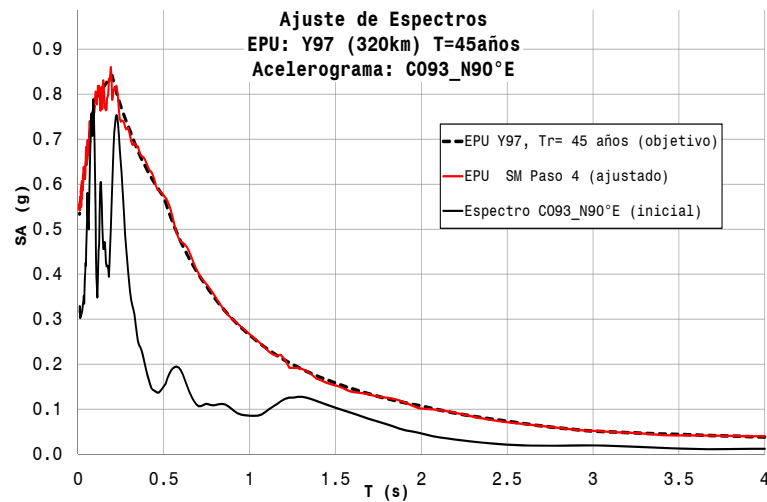


Figura E.21 Espectro ajustado del evento CO93_ N90°E con el EPU de Y97 para Tr=45 años.

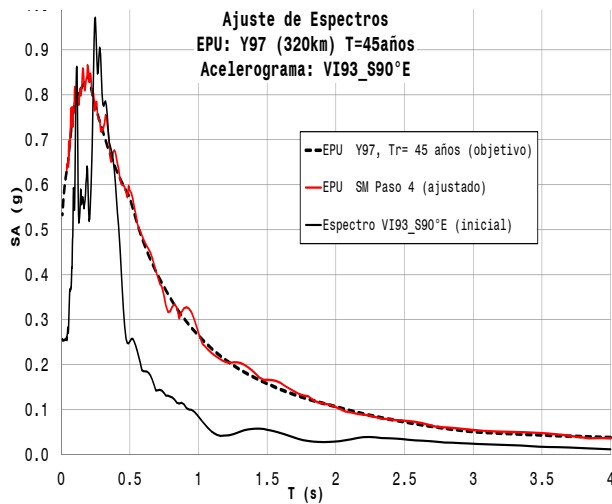


Figura E.22 Espectro ajustado del evento VI93_ S90°E con el EPU de Y97 para Tr=45 años.

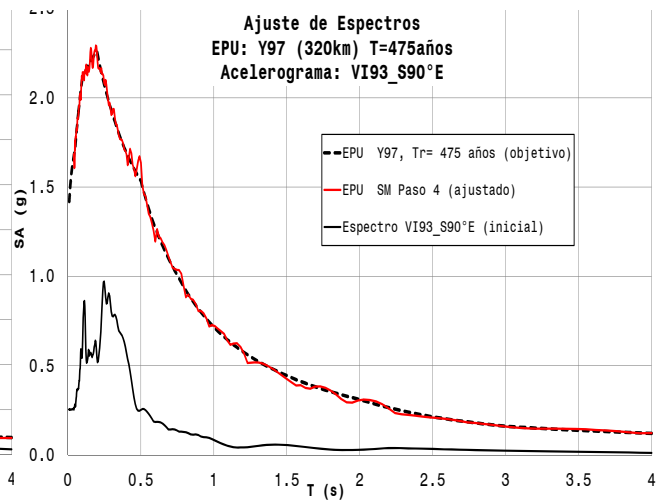


Figura E.23 Espectro ajustado del evento VI93_ S90°E con el EPU de Y97 para Tr=475 años.

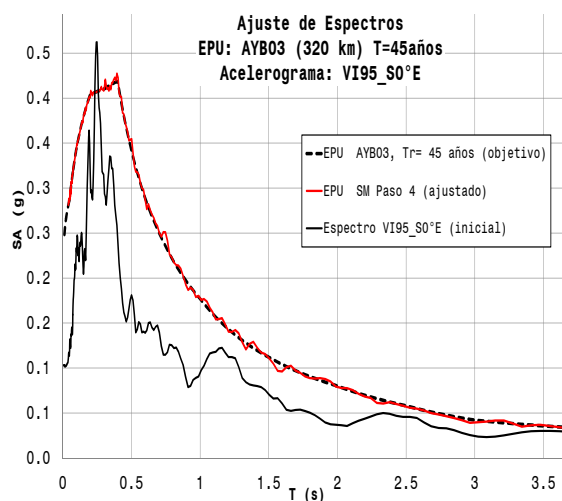


Figura E.24 Espectro ajustado del evento VI95_ S0°E con el EPU de AYB03 para $Tr=45$ años.

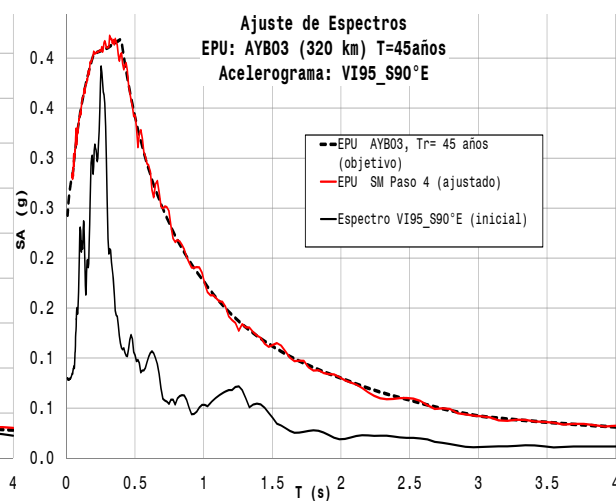


Figura E.26 Espectro ajustado del evento VI95_ S90°E con el EPU de AYB03 para $Tr=45$ años.

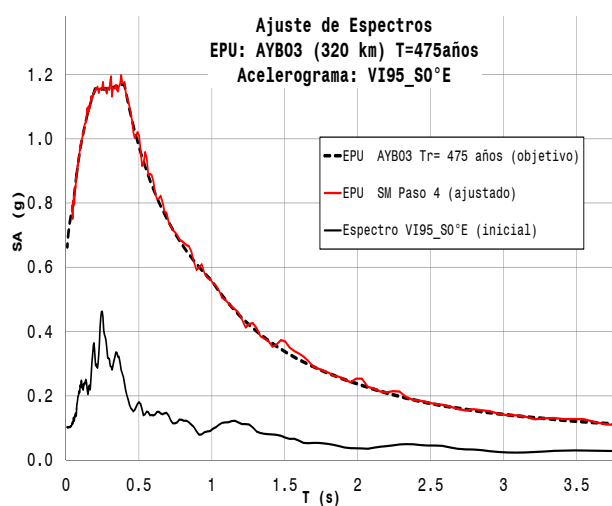


Figura E.25 Espectro ajustado del evento VI95_ S0°E con el EPU de AYB03 para $Tr=475$ años.

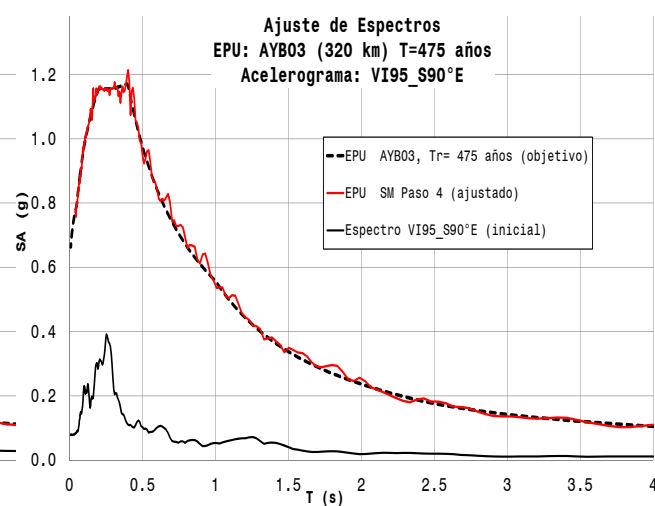


Figura E.27 Espectro ajustado del evento VI95_ S90°E con el EPU de AYB03 para $Tr=475$ años.

Apéndice F

Ejemplo de cálculo de un Espectro condicional promedio (CMS- ϵ)

En este apéndice se presenta un ejemplo de cálculo para CMS- ϵ , de acuerdo a la metodología planteada por Baker (2010); para este ejemplo se utilizó la ecuación de atenuación de Youngs *et al.* (1997), y el espectro de peligro uniforme (EPU) calculado para $T_r=475$ años, con el modelo de fallas 2, calculado también con la ecuación de Youngs *et al.* (1997). El procedimiento de cálculo puede dividirse en cuatro pasos a seguir, según Baker (2010) se tiene:

Paso 1: Determinar la aceleración espectral (SA) objetivo para cierto periodo, y las magnitudes correspondientes de M, R y ϵ

A partir de un proceso de desagregación, calculado para un periodo definido, que en general corresponde al periodo fundamental de la estructura que se analiza, y una aceleración espectral (SA) objetivo, se obtienen los valores medios de M, R y $\epsilon(T^*)$. Para este ejemplo, la desagregación del peligro se realizó para $SA=2.3g$ y $T=0.2$ s, con lo que se obtuvo: $M=7.28$, $R=11.9$ km y $\epsilon(0.2s)=2.1$. Las gráficas de desagregación se pueden observar en la figura E.1 del apéndice E.

Paso 2: Utilización de relaciones de atenuación, dados M y R.

En este paso se busca obtener las aceleraciones espectrales y desviación estándar para todos los periodos en estudio, utilizando una ecuación de atenuación adecuada. En este ejemplo se utilizó la ecuación de Youngs *et al.* (1997), en la tabla F.1 se presentan las magnitudes de la aceleración espectral (segunda columna) calculada con Y97 para $M=7.28$ y $R=11.9$ km, en la tercera columna se presenta la desviación estándar para cada periodo y en la última columna la SA del EPU para $T_r=475$ años.

T	Y97, SA(g)	σ	EPU: Y97, SA(g)
s	M=7.28, R=11.9km		Tr=475
0.01	0.54	0.170	1.08
0.05	0.88	0.170	1.71
0.1	1.09	0.170	2.11
0.15	1.16	0.300	2.20
0.2	1.21	0.520	2.30
0.3	1.04	0.300	1.93
0.4	0.92	0.170	1.70
0.5	0.83	0.050	1.54
0.75	0.58	-0.050	1.01
1	0.38	-0.050	0.72
1.5	0.22	-0.085	0.45
2	0.14	-0.085	0.31
2.5	0.09	-0.085	0.21
3	0.06	-0.085	0.16
4	0.04	-0.085	0.12

Tabla F.1 Valores de SA(g) y EPU (Tr=475 años) calculados con Y97 para diferentes periodos.

Paso 3: Cálculo de ϵ para otros periodos, conocido el valor de $\epsilon(T^*)$

En este paso se buscan calcular los valores “promedios condicionales” de ϵ para diferentes periodos. Este proceso se utilizó el valor conocido de $\epsilon(T^*)$ que corresponde al periodo fundamental de la estructura calculado en el paso 1, obtenido de la desagregación de peligro sísmico, al cual se multiplica por un coeficiente de correlación para valores de ϵ , calculado para dos periodos.

$$\mu_{\epsilon(T_i)|\epsilon(T^*)} = \rho(T_i, T^*) \cdot \epsilon(T^*) \quad (F.1)$$

Donde $\mu_{\epsilon(T_i)|\epsilon(T^*)}$ es el valor de ϵ promedio entre dos periodos T_i, T^* . El coeficiente de correlación puede calcularse utilizando una base de datos de sismos de diferentes características, sin embargo, se han realizado correlaciones previas encontrándose ecuaciones que permiten su cálculo sencillo y aproximado, un ejemplo de ellas es la desarrollada por Baker y Cornell (2006):

$$\rho(T_{min}, T_{max}) = 1 - \cos\left(\frac{\pi}{2} - \left(0.359 + 0.163 \cdot I_{(T_{min} < 0.189)} \ln \frac{T_{min}}{0.189}\right) \ln \frac{T_{max}}{T_{min}}\right) \quad (F.2)$$

Donde $I_{(T_{min} < 0.189)}$ es un indicador igual a 1 cuando $T_{min} < 0.189s$ e igual a 0 en otros casos, T_{min} y T_{max} corresponden a el periodo mas pequeño y el más grande de los dos periodos de interés; la ecuación F.2 es valida para un rango de periodos entre 0.05 s y 5 s. Existen otras metodologías, como la que se utilizó en este ejemplo, desarrollada por Baker y Jayaram (2008), que permite el cálculo del factor de correlación para una rango de periodos

BIBLIOGRAFÍA

entre 0.01 s a 10 s:

$$C_1 = 1 - \cos\left(\frac{\pi}{2} - 0.366 \ln\left(\frac{T_{max}}{\max(T_{min}, 0.109)}\right)\right) \quad (F.3)$$

$$C_2 = \begin{cases} 1 - 0.105 \left(1 - \frac{1}{1 + e^{100T_{max}^{-5}}}\right) \left(\frac{T_{max} - T_{min}}{T_{max} - 0.0099}\right) & \text{si } T_{max} < 0.2 \\ 0 & \text{otros casos} \end{cases} \quad (F.4)$$

$$C_3 = \begin{cases} C_2 & \text{si } T_{max} < 0.109; \\ C_1 & \text{otros casos.} \end{cases} \quad (F.5)$$

$$C_4 = C_1 + 0.5(\sqrt{C_3} - C_3) \left(1 + \cos\left(\frac{\pi T_{min}}{0.109}\right)\right) \quad (F.6)$$

$$\text{si } T_{max} < 0.109 \quad \rho_{\epsilon(T_1), \epsilon(T_2)} = C_2 \quad (F.7)$$

$$\text{si } T_{max} > 0.109 \quad \rho_{\epsilon(T_1), \epsilon(T_2)} = C_1 \quad (F.8)$$

$$\text{si } T_{max} < 0.2 \quad \rho_{\epsilon(T_1), \epsilon(T_2)} = \min(C_2, C_4) \quad (F.9)$$

$$\text{otros casos} \quad \rho_{\epsilon(T_1), \epsilon(T_2)} = C_4 \quad (F.10)$$

La ecuación F.2 da aproximaciones muy cercanas a las calculadas con las ecuaciones de Baker y Jayaram (2008). Para el ejemplo, considerando $\epsilon(0.2s)=2.1$, se utilizaron las ecuaciones F.3 a F.10, encontrándose el factor de correlación y los valores de ϵ para diferentes periodos, en la tabla F.2 se muestran los resultados.

T (s)	T_{max}	T_{min}	C1	C2	C3	C4	ρ	ϵ
0.01	0.2	0.01	0.780	0.000	0.780	0.881	0.881	1.85
0.05	0.2	0.05	0.780	0.000	0.780	0.838	0.838	1.76
0.1	0.2	0.1	0.780	0.000	0.780	0.781	0.781	1.64
0.15	0.2	0.15	0.895	0.000	0.895	0.911	0.895	1.88
0.2	0.2	0.2	1.000	0.000	1.000	1.000	1.000	2.10
0.3	0.3	0.2	0.852	0.000	0.852	0.918	0.852	1.79
0.4	0.4	0.2	0.749	0.000	0.749	0.858	0.749	1.57
0.5	0.5	0.2	0.671	0.000	0.671	0.809	0.671	1.41
0.75	0.75	0.2	0.535	0.000	0.535	0.718	0.535	1.12
1	1	0.2	0.444	0.000	0.444	0.652	0.444	0.93
1.5	1.5	0.2	0.328	0.000	0.328	0.556	0.328	0.69
2	2	0.2	0.254	0.000	0.254	0.487	0.254	0.53
2.5	2.5	0.2	0.202	0.000	0.202	0.433	0.202	0.42
3	3	0.2	0.163	0.000	0.163	0.388	0.163	0.34
4	4	0.2	0.110	0.000	0.110	0.318	0.110	0.23

Tabla F.2 Valores del factor de correlación, según Baker y Jayaram (2008).

Paso 4: Cálculo del espectro condicional

El CMS puede calcularse utilizando los resultados de los pasos 2 y 3, el valor condicional de aceleración espectral puede calcularse según la ecuación F.11:

$$SA_{CMS} : \ln SA(T_i) | \ln SA(T^*) = SA(Y97_{M,R,T_i}) + \rho(T_i, T^*) \epsilon(T^*) \sigma_{\ln SA}(T_i) \quad (F.11)$$

Donde: $SA(Y97_{M,R,T_i})$ y $\sigma_{\ln SA}(T_i)$ fueron calculados en el paso 2, según la relación de atenuación de Y97; $\rho(T_i, T^*)$ calculado en el paso 3, y $\epsilon(T^*) = 2.1$ definido en el paso 1, para $T^*=0.2$ s. En la tabla F.3 se presentan los cálculos para cada periodo del Espectro Condicional- ϵ , y en la figura F.1 se presenta la comparación entre el CMS calculado, el EPU para $Tr=475$ años y las $SA(g)$ calculadas con Y97 tanto para fallas intraplaca como interplaca.

Se puede observar que el CMS condicional es menor que el EPU, excepto en el periodo de 0.2 s donde sus SA empatan, debido a que fue condicionado para ese objetivo; en muchos casos es recomendable utilizar el CMS- ϵ (Baker, 2010) para obtener acelerogramas de sitio, debido a que representa la ocurrencia condicionada de un espectro de respuesta a un periodo y aceleración espectral objetivo, mientras que el EPU implica de manera conservadora la ocurrencia de aceleraciones espectrales grandes para todos los periodos en un solo evento sísmico.

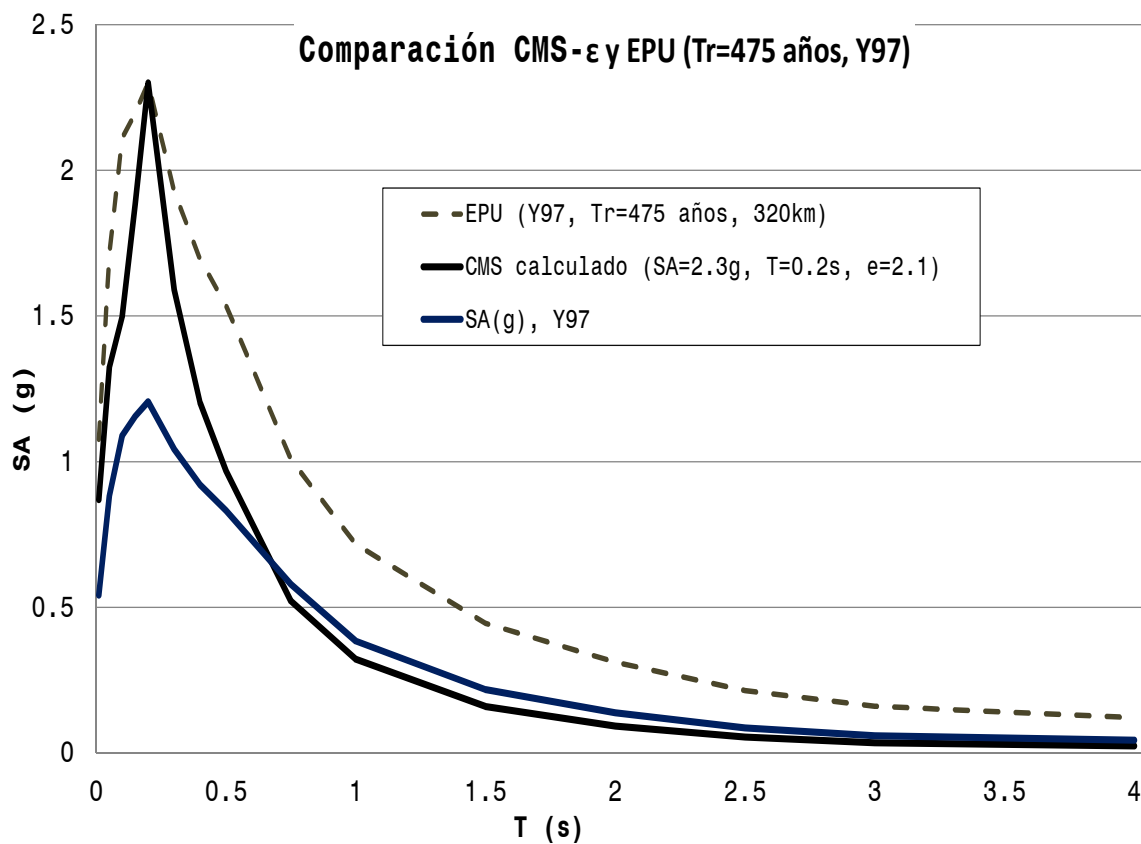


Figura F.1 Gráficas del CMS- ϵ , EPU ($Tr=475$ años) y la ec. Atenuación Y97

T	Y97, SA(g)	σ	ρ	CMS
(s)	M=7.28, R=11.9 km			SA(g)
0.01	0.54	0.170	0.88	0.86
0.05	0.88	0.170	0.84	1.18
0.1	1.09	0.170	0.78	1.37
0.15	1.16	0.300	0.89	1.72
0.2	1.21	0.520	1.00	2.30
0.3	1.04	0.300	0.85	1.58
0.4	0.92	0.170	0.75	1.19
0.5	0.83	0.050	0.67	0.90
0.75	0.58	-0.050	0.53	0.52
1	0.38	-0.050	0.44	0.34
1.5	0.22	-0.085	0.33	0.16
2	0.14	-0.085	0.25	0.09
2.5	0.09	-0.085	0.20	0.05
3	0.06	-0.085	0.16	0.03
4	0.04	-0.085	0.11	0.02

Tabla F.3 Valores calculados para el CMS- ϵ