

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Programa de Posgrado en Ciencias
en Ciencias de la Tierra**

**Estimación de peligro sísmico en el norte de BC, con
aplicación en el cálculo de la respuesta dinámica de dos
edificios**

Tesis

Que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Rogelio Arce Villa

Ensenada, Baja California, México
2016

Tesis defendida por
Rogelio Arce Villa
y aprobada por el siguiente comité

Dr. José Antonio Vidal Villegas
Codirector del Comité

Dr. Luis Munguía Orozco
Codirector del Comité

Dr. Fortunato Espinoza Barreras

C. Dr. Cesar Alfonso Reyes Zamora

Dr. Josué Álvarez Borrego



Dr. Juan García Abdeslem
Coordinador del programa de posgrado

Dra. Rufina Hernández Martínez
Directora de estudios de posgrado

Resumen de la tesis que presenta **Rogelio Arce Villa** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias de La Tierra con orientación en sismología.

Estimación de peligro sísmico en el norte de BC, con aplicación en el cálculo de la respuesta dinámica de dos edificios

Resumen aprobado por:

Dr. José Antonio Vidal Villegas
Codirector de Tesis

Dr. Luis Munguía Orozco
Codirector de Tesis

Dado el creciente desarrollo de edificios altos a lo largo de la costa de Tijuana, Rosarito y Ensenada, resulta de interés analizar el comportamiento dinámico de estas estructuras durante la ocurrencia de sismos fuertes de la región. En la primera parte de esta tesis se analiza la respuesta dinámica de dos edificios a través del estudio de registros de vibración ambiental. Para uno de ellos se obtuvo su respuesta teórica, la cual se compara con su respuesta experimental. El estudio de los edificios inició con la instalación de sismógrafos y acelerógrafos en campo libre y en distintos niveles de un edificio de 12 pisos ubicado en Puerto Salina, Ensenada, Baja California. Este experimento se repitió para un edificio de 3 niveles ubicado en la ciudad de Tijuana, Baja California. Con los registros de vibración ambiental, se determinaron las funciones de transferencia de los edificios y de los sitios de registro en campo libre. Con base en las funciones de transferencia determinadas, se identificaron los primeros dos modos de vibración del suelo y de cada edificio. Utilizando cocientes H/V , derivados de registros de velocidad en campo libre, se determinó que en Puerto Salina la frecuencia fundamental de vibración del suelo es de 1.3 Hz, mientras que la frecuencia del segundo modo es de 3.4 Hz. Para el edificio de Puerto Salina, se determinó el primer modo de vibración a partir de cocientes espectrales obtenidos de los registros horizontales de velocidad, el cual se observó a 2.0 Hz en la componente longitudinal y a 2.4 Hz en la componente transversal. En los cocientes espectrales obtenidos de registros de aceleración no se distinguió ninguna frecuencia predominante.

En la segunda parte de esta tesis, se hizo un análisis probabilístico de peligro sísmico (PSHA, por sus siglas en inglés) para la región norte de Baja California. Un resultado de este análisis fue un mapa de peligro sísmico, el cual indicó los niveles de aceleración esperados en los dos sitios en estudio durante la ocurrencia de sismos regionales. Un segundo resultado del PSHA fue un proceso de desagregado del peligro sísmico, el cual mostró de qué tamaño y en dónde están ubicadas las fuentes sísmicas que plantean el mayor peligro a los sitios de interés. Como tercer resultado, del PSHA se obtuvo un espectro de respuesta de peligro uniforme para el edificio de Puerto Salina. Con este espectro, y con la información de la magnitud de los sismos de peligro potencial, la aceleración esperada y la distancia a los sitios, se buscó un registro de aceleración que sirviera como fuente externa de movimiento en el edificio bajo estudio. Las características de este registro son tales que el espectro de respuesta que se calcule de él sea lo más parecido al espectro de peligro uniforme resultante del PSHA. Por lo tanto, el registro de aceleración encontrado contiene movimientos del suelo muy

similares a los que estaría expuesto el edificio considerado para un sismo de magnitud M y con epicentro a distancia R del sitio. Finalmente, el registro de aceleración se utilizó para representar la excitación sísmica en la base del edificio y se propagó hacia los niveles superiores produciendo desplazamientos en los doce niveles de la estructura bajo análisis. Una vez conocidos los desplazamientos, éstos se utilizan para calcular fuerzas, momentos de volteo y otros parámetros de interés en la respuesta del edificio.

Palabras clave: Vibración ambiental, sismógrafos, acelerógrafos, cocientes H/V, peligro sísmico

Abstract of the thesis presented by **Rogelio Arce Villa** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Earth Science, focusing on seismology.

Estimation of seismic hazard in northern BC, with application in the dynamic response of two buildings

Abstract approved by:

Dr. José Antonio Vidal Villegas
Codirector thesis

Dr. Luis Munguía Orozco
Codirector thesis

Due to the increasing construction of tall buildings along the Tijuana, Rosarito and Ensenada coasts, it is of great interest to analyze the dynamic behavior of those structures during the occurrence of regional strong earthquakes. In the first part of the thesis, we analyze the dynamic response of two buildings through the study of environmental vibration recordings. For one of them a theoretical response was computed and compared to its experimental response. The study of these buildings began with the installation of seismographs and accelerometers in the free field and at different levels of a 12-story building located in Puerto Salina, in Ensenada, Baja California. This experiment was repeated for a three-story building that is located in Tijuana, Baja California. With the environmental vibration recordings collected, we determined the transfer functions of the buildings and of the free field sites. Based on the determined transfer functions, we identified the fundamental modes of vibration for the ground at the free field sites and for each building. Using H/V spectral ratios from free-field velocity data recorded at Puerto Salina, frequencies of 1.3 Hz and 3.4 Hz were determined for the first and second modes of vibration, respectively. For the building at Puerto Salina, spectral ratios of the horizontal velocity recordings were used to estimate the fundamental frequency of vibration. In this case, we obtained fundamental frequencies of 2.0 Hz and 2.4 Hz from the longitudinal and transverse components of motion, respectively. Also of interest was to note that the spectral ratios calculated from acceleration recordings did not show any predominant frequency.

In the second part of this thesis, a probabilistic seismic hazard analysis (PSHA) was conducted for the north region of Baja California. A first result of this analysis is a map of seismic hazard with the acceleration levels that are expected during the occurrence of regional earthquakes at the two considered sites. A second result of PSHA was a disaggregation process of the seismic hazard, which provides insights into the size and location of the sources that are the most important for the hazard at the study sites. As a third result, PSHA produced a uniform hazard response spectrum for the site located in Puerto Salina. Based on the uniform hazard spectrum and on the magnitude, expected accelerations and distance from potentially hazardous earthquakes to the site, we searched several earthquake data basis for an acceleration recording that could be used as the design earthquake. The ground motion characteristics of the selected accelerogram must be similar to those which the building would be exposed to for an earthquake of magnitude M and epicenter distance R . Then, the selected acceleration time history was applied at the base of the structure and propagated up wards to the higher levels of the building, producing displacements of the individual levels. Once the

displacements were known, shear forces, overturning moments, and other parameters of interest in the response of the building were calculated.

Keywords: vibration recordings, seismographs, accelerometers, H/V spectral ratios, seismic hazard

Dedicatoria

A mi familia:

**Mi padre Rogelio G. Arce Espinoza
Mi madre María del Consuelo Villa y Pérez
Mi hermano David y su esposa Lizeth
Mis sobrinos David y Fernando
Y mi tío Alonso Arce**

Agradecimientos

A CICESE Y CONACYT, por todas las facilidades otorgadas para la realización de este proyecto.

A mi familia por siempre apoyarme.

A mis directores de Tesis, Antonio Vidal y Luis Munguía, por sus enseñanzas y su inmensa paciencia, por siempre brindarme el apoyo necesario para la realización de este trabajo, por su confianza pero sobre todo por su amistad.

A Fortunato Espinoza por su colaboración y consejos tanto en el ámbito escolar en como personal.

A Alfonso Reyes, por tener siempre disposición cuando solicite su asesoría.

A Josué Álvarez, por sus sugerencias y comentarios que fueron muy importantes en desarrollo de la tesis.

A Erik R., quien fungió como si fuera miembro de mi comité de tesis al ayudar en todas las etapas de desarrollo de ésta.

Al Colegio de Ingenieros Civiles y al Colegio de Arquitectos de la ciudad de Tijuana, por permitir la instrumentación de sus instalaciones.

Al expresidente del Colegio de Ingenieros Civiles de Tijuana, Ing. Pablo Santiago Hernández L. por su amabilidad y apoyo.

Al Sr. David Rosas Bazúa y al ingeniero Alejandro Ortiz, quienes muy amablemente nos permitieron la instrumentación del edificio de Puerto Salina.

A mis profesores, Acosta Chang, Alejandro Nava, José Frez, Jonás De Basabe, por siempre estar disponibles para asesorarme y orientarme, así como el resto de los profesores de CICESE.

A Miguel Ángel Arthur, por su amistad y por siempre estar dispuesto a asistirme con mucha paciencia transmitiéndome algo de su amplio conocimiento en software.

A Jessica Jasmin por sus interminables asesorías de GIS que me ofreció muy amablemente.

A Euclides y Gustavo por toda su colaboración y buena disposición en cuanto a instrumentación.

A los chicos RESNOM, Luis Orozco y Oscar Gálvez por apoyarme con su experiencia y conocimientos.

A mis compañeros de sismología, German y Leandro, por brindarme su amistad y colaboración técnica.

A mis compañeras de semestres superiores del área de sismología, Amalia y Claudia Quinteros quienes me guiaron y apoyaron en el proceso de la maestría.

A Mary Jo por sus valiosos consejos y apoyo incondicional, desde el inicio hasta el final de esta etapa.

A Mary Cruz, Ana Rosa y todo el personal administrativo.

A mis compañeros y amigos Esteban, Julio, Omar, Mastache, Fernando, Oliver, Andrea, Claudia, Pipe, Kike, Timo, Adrián, Ruth y a todas las personas que tuve el placer de conocer en CICESE, ya que sin su apoyo y amistad, tanto en los momentos buenos, como en los difíciles, no me hubiera sido posible terminar este ciclo de mi vida.

Ahh! y a mi compañero Jovany Moran... su apoyo fue muy importante en los trabajos realizados.

Tabla de contenido

	Página
Resumen español	ii
Resumen inglés	iv
Dedicatorias	vi
Agradecimientos	vii
Lista de figuras	xi
Lista de tablas	xix
Capítulo 1. Introducción	
1.1 Zona de estudio.....	1
1.2 Antecedentes de sismicidad.....	2
1.3 Acerca del tema.....	2
1.4 Estructuras en estudio.....	5
1.4.1 Edificio en La Salina.....	5
1.4.2 Edificio en Tijuana.....	7
1.5 Objetivos.....	8
1.5.1 General.....	8
1.5.2 Particulares.....	8
Capítulo 2. Vibración ambiental	
2.1 Métodos espectrales.....	11
2.2 Cálculo de razones espectrales.....	14
2.3 Instrumentación utilizada.....	16
2.4 Desarrollo.....	17
2.4.1 Mediciones en Tijuana.....	17
2.4.2 Mediciones en Puerto Salina.....	25
2.5 Resultados.....	27
2.5.1 Resultados de las mediciones en Tijuana.....	27
2.5.2 Resultados de las mediciones en Puerto Salina.....	30
Capítulo 3. Peligro sísmico	
3.1 Acerca del peligro sísmico.....	36
3.1.1 Análisis determinístico de peligro sísmico.....	37
3.1.2 Análisis probabilístico de peligro sísmico.....	39
3.2 Método de Cornell.....	43
3.2.1 Caracterización de fuentes sísmicas.....	43
3.2.2 Caracterización de la sismicidad.....	48
3.2.3 Ecuación predictiva de movimientos fuertes.....	52
3.2.4 Ecuación de peligro sísmico.....	53
3.3 Desarrollo.....	58
3.4 Resultados de peligro sísmico.....	63
3.4.1 Mapas de peligro sísmico.....	65
3.4.2 Desagregado de peligro sísmico para Puerto Salina.....	68

3.4.3 Desagregado de peligro para el sitio en Tijuana.....	72
3.4.4 Espectro de peligro uniforme.....	77
3.4.5 Selección del registro de diseño.....	78

Capítulo 4. Respuesta Estructural

4.1 Sistema con múltiples grados de libertad.....	83
4.2 Análisis con SAP2000.....	92
4.3 Análisis con función de transferencia.....	94

Capítulo 5. Discusión y conclusiones

5.1 Discusión.....	97
5.2 Conclusiones.....	101
5.2 Recomendaciones.....	102

Lista de referencias bibliográficas.....	104
---	------------

Apéndices

Apéndice I.....	108
Apéndice II.....	110
Apéndice III.....	112

Lista de figuras

Figura	Página
1 Marco tectónico de la región norte de Baja California y principales fallas asociadas al movimiento relativo de placas. B=Falla Borrego, CA=Falla Calabazas, CH=Falla Chupamirtos, CR=Falla Cañón Rojo, CU=Falla Cucapah, M=Falla Maximinos, ON=Falla Ojos Negros, P=Falla Pescaderos, S=Falla Bahía Soledad y TH=Falla Tres Hermanos.....	1
2 Mapa de temblores con magnitudes mayores o iguales a 3.0, registrados del año 1973 al presente, obtenidos del catálogo de la Red Sísmica del Noroeste de México.....	3
3 Mapa de sismicidad histórica en la región. En color blanco datos de sismos (de 1800 al 1994) que fueron tomados del catálogo publicado por Stein y Hanks (1998). En color rojo sismos (de 1932 a 1986) tomados Anderson <i>et al.</i> ,(1989).....	3
4 Fotografías de edificios tomadas en la franja costera de Baja California (BC): a) Rosarito, B. C. http://www.Skycrapercity.com/showthread.phpt=1159207&page= b) Popotla, B.C. http://www.Skycrapercity.com/showthread.php?t=765834&page=63 fecha de consulta, octubre de 2015.....	4
5 a). Edificio de 12 niveles ubicado en Puerto Salina, B. C. b) Corte longitudinal del edificio, tomado de Díaz (2005).....	5
6 Plantas arquitectónicas del edificio, tomadas de Díaz (2005). a) Planta de primer nivel (asimétrica en ambas direcciones). b) Planta de segundo nivel (asimétrica en ambas direcciones). c) Planta Tipo (similar del tercer al doceavo nivel), simétrica en una dirección.....	6
7 Edificio sede del Colegio de Ingenieros Civiles de Tijuana y del Colegio de Arquitectos de Tijuana. a) Vista frontal (sureste). b) Vista lateral (noreste).....	7
8 Geología superficial de la zona urbana de la ciudad de Tijuana tomada de Gastil, (1975). Igea=Rocas volcanicas, k(Gr)=Rocas intrusivas félsicas(cretácico), Q(ar)= Arenisca (cuaternario), Q(cg)=Conglomerado(cuaternario), Tpl(ar)=Areniscas y conglomerados(terciario), Ts(B)=Rocas volcanicas (terciario), N/E= No especificada.....	8

9	Diagrama del edificio en La Salina B.C. En esta figura, $s(t)$ y $e(t)$ son las series de tiempo y $h(t)$ representa la respuesta del edificio.....	12
10	Diagrama que ilustra el procesado de los registros de vibración ambiental.....	15
11	Instrumentación utilizada en las mediciones de vibración ambiental. a) Acelerómetro Episensor y Grabadora Reftek, b) Sismógrafo PMD, c) Sismógrafo Sara, d) Sismómetro Trillium Compact y Grabadora Taurus, d) Sismómetro Guralp, grabadora Reftek. Cada equipo se muestra con un dispositivo GPS y su fuente de poder.....	16
12	Sismógrafos utilizados para el registro de vibración ambiental en el edificio del Colegio de Ingenieros Civiles y del Colegio de Arquitectos de la ciudad de Tijuana. a) Sensor Guralp y grabadora Reftek colocados en el sótano del edificio. b) Sensor Trillium compact y grabadora Taurus colocados en el 3er nivel del edificio.....	17
13	Diagramas que ilustran la posición de los sismómetros en cada uno de los arreglos. Los triángulos invertidos indican la ubicación de los sismógrafos: 1 Guralp-Reftek, 2 PMD-PMD y 3 Trillium-Taurus.....	18
14	Segmento del sismograma, sin corrección por efecto de instrumento, grabado el día 8 de octubre de 2014 en el edificio de Tijuana. En color rojo se muestran las trazas obtenidas con el sismómetro Trillium Compact, ubicado en el tercer nivel del edificio. En color azul se muestran las trazas obtenidas con el sismómetro Guralp, obtenidas en el sótano. Las flechas indican el arribo de las ondas P y S, y los rectángulos indican los segmentos de vibración ambiental (rectángulo morado) y sismo (rectángulo verde), que más adelante se utilizarán para calcular el razón espectral H/V.....	19
15	Mapa donde se muestra la ubicación del sismo ocurrido el día 8 de octubre de 2014 (modificado de http://earthquake.usgs.gov). La estrella amarilla muestra la ubicación del edificio donde se obtuvieron los registros y el círculo blanco el epicentro del sismo. También se muestra la solución del tensor de momento ("bola de playa") reportada en el catálogo.....	20
16	Segmento del registro del sismo (65536 muestras). La traza azul corresponde al tercer nivel del edificio, mientras que la roja corresponde al sótano. Las trazas han sido corregidas por efecto de instrumento y está filtrado de 0.05 a 1.0 Hz. La secuencia de los sismogramas es Vertical (V), Longitudinal (L) y Transversal (T) al edificio.....	22

17	Segmento del registro del sismo (65536 muestras). La traza azul corresponde al tercer nivel del edificio, mientras que la roja corresponde al sótano. Las trazas han sido corregidas por efecto de instrumento. La secuencia de los sismogramas es Vertical (V), Longitudinal (L) y Transversal (T) al edificio.....	22
18	Segmento del registro de vibración ambiental (65536 muestras tomadas a intervalos de 0.01 segundos). La traza azul corresponde al tercer nivel del edificio, mientras que la roja corresponde al sótano. Las trazas han sido corregidas por efecto de instrumento. La secuencia de los sismogramas es Vertical (V), Longitudinal (L) y Transversal (T) al edificio.....	23
19	Espectros de amplitud promedio, calculados a partir de 62 segmentos de 4096 muestras de los registros del sismo. El espectro azul corresponde al registro obtenido en el tercer nivel, mientras que el rojo corresponde al registro obtenido en el sótano. La flecha indica un pico observado a 5Hz, frecuencia que puede ser interpretada como la frecuencia fundamental de vibración del edificio.....	24
20	Espectros de amplitud promedio, calculados a partir de 62 segmentos de 4096 muestras de vibración ambiental. El espectro azul corresponde al obtenido con el registro del tercer nivel, mientras que el rojo corresponde al obtenido del registro del sótano. La flecha indica el pico observado a 5Hz en la figura 18.....	24
21	Colocación de sensores: a) en campo libre y b) dentro del edificio.....	25
22	Ubicación de los sensores dentro del edificio en los niveles 3, 5, 6,10 y 11 (círculo rojo).....	26
23	Registros de vibración ambiental obtenidos en distintos niveles del edificio y campo libre.....	27
24	Cocientes espectrales V_3/V_S , L_3/L_S y T_3/T_S , calculados del registro del sismo.....	28
25	Cocientes espectrales V_3/V_S , L_3/L_S y T_3/T_S , calculados del registro de vibración ambiental.....	28
26	Cocientes H/V calculados a partir de registros de vibración ambiental obtenidos en campo libre, Sótano, 1er nivel y 3er nivel.....	29
27	Cocientes de los espectros registrados en el décimo nivel y en el sótano, para las componentes vertical, longitudinal y transversal.....	30

28	Cocientes espectrales, obtenidos a partir de registros de vibración ambiental de distintos niveles del edificio. a) Décimo nivel entre el sótano, b) sexto nivel entre el sótano, c) quinto nivel entre el sótano y d) tercer nivel entre el sótano. Las líneas negras corresponden a los cocientes espectrales (amplitud), mientras que las líneas azules representan la desviación estándar.....	32
29	Razones espectrales del décimo nivel entre el sótano para las componentes vertical, longitudinal y transversal calculados a partir de los registros de aceleración.....	33
30	Cocientes espectrales H/V obtenidos a partir de registros de ruido ambiental en aceleración y velocidad. Esta figura muestra que en la vecindad del edificio de La Salina las frecuencias de resonancia del primero y segundo modos de vibración del suelo son de 1.2 Hz y 3.2 Hz respectivamente.....	34
31	Curvas de peligro sísmico de un ejemplo descrito en el libro de Kramer (1996).....	41
32	Mapa del desagregado del peligro sísmico que las cuatro fuentes lineales consideradas plantean en el sitio marcado con el cuadro azul. Cada barra en este mapa representa la suma de las contribuciones de todos los sismos de diferentes magnitud es con probabilidad de ocurrir en cada una de las distancias fuente-sitio.....	42
33	En esta gráfica se muestra con línea azul, el espectro de peligro uniforme calculado para San Pedro Cliff (norte de Italia), con probabilidad de excedencia 5%, amortiguamiento relativo 5% y tiempo de exposición 50 años. Con línea rosa se muestra el espectro de respuesta del sismo de Friuli, el cual ocurrió el 15 de Septiembre de 1976, con magnitud M_W 6.0. La línea roja es el espectro de respuesta del sismo de Friuli, el cual fue escalado para obtener una mejor aproximación al espectro de peligro uniforme (Figura modificada de Morales et al., 2012).....	42
34	Mapa de peligro sísmico de la región sur del sur de California, Estados Unidos. Se muestra la aceleración espectral en por ciento de g a 1.0 s, con 2 % de probabilidad de excedencia en 50 años (Modificado de Kalkan <i>et al.</i> , 2010).....	43
35	Diagrama de la determinación de la distribución de probabilidad de distancia para una fuente lineal.....	45
36	Distribución de probabilidades de que $R=r$, del ejemplo de la Figura 35.....	46

37	Ejemplo de la caracterización de una fuente compleja.....	48
38	Diagrama de la línea recta de la ecuación de Gutenberg-Richter.....	49
39	Línea recta de la ecuación de Gutenberg-Richter, la cual está acotada por una magnitud mínima (m_0) y una magnitud máxima (m_{max}).....	50
40	Diagrama de una curva predictiva de movimientos fuertes para sismos de magnitud m	52
41	Ejemplo de una matriz de probabilidades de excedencia, para distintas combinaciones de magnitud y distancia. Donde k representa el número de intervalos de distancias y j el número de intervalos de magnitud.....	54
42	Relación entre el periodo de retorno y el tiempo de exposición, para distintas probabilidades de excedencia.....	58
43	Fuentes lineales consideradas en el análisis de peligro sísmico. El polígono marcado con línea discontinua delimita las regiones de ambiente rocoso (AR) y sedimentario (AS).....	59
44	Distribuciones de probabilidad de que la distancia fuente-sitio de evaluación se encuentre en uno de los intervalos de distancia definidos.....	61
45	Áreas de sismicidad utilizadas en el cálculo de los parámetros a y b de la ley de Gutenberg y Richter que describen la sismicidad de cada zona.....	62
46	Distribuciones de probabilidad de magnitud para algunas de las fuentes consideradas.....	63
47	Mapa de peligro sísmico, de aceleración horizontal pico (g) con 10% de excedencia en 50 años. Los círculos en color blanco y amarillo indican los sitios donde se ubican los edificios en Tijuana y Puerto Salina respectivamente.....	65
48	Mapa de peligro sísmico, de aceleración espectral (g), 10% de excedencia en 50 años, para un oscilador con frecuencia natural de 2 Hz (periodo 0.5 s) y 5% de amortiguamiento. Los círculos en color blanco y amarillo indican los sitios donde se ubican los edificios en Tijuana y Puerto Salina respectivamente.....	66

49	Mapa de peligro sísmico, de aceleración espectral (g), para un oscilador con frecuencia natural de 5 Hz (periodo 0.2 s) y 10% de excedencia en 50 años. Los círculos en color blanco y amarillo indican los sitios donde se ubican los edificios en Tijuana y Puerto Salina respectivamente.....	67
50	Curvas de peligro sísmico de aceleración espectral, para el sitio del edificio ubicado en Puerto Salina. a) Tasa anual de excedencia del parámetro de aceleración espectral. b) Probabilidad de excedencia de la aceleración espectral.....	68
51	Desagregado de peligro sísmico estimado en el sitio del edificio de Puerto Salina (Punto azul ubicado al centro de los círculos). Las líneas verticales representan la contribución al peligro de cada uno de los segmentos de falla considerados. Mientras más larga sea la longitud de estas líneas, mayor es la contribución al peligro.....	59
52	Contribuciones al peligro sísmico total de todos los segmentos de falla considerados.....	70
53	Contribución al peligro en La Salina de cada una de las combinaciones de magnitud-distancia de la falla Vallecitos.....	71
54	Contribución individual de la falla Vallecitos al peligro sísmico en el sitio de interés (punto negro).....	72
55	Curvas de peligro sísmico de aceleración espectral en el sitio donde se ubica el edificio en Tijuana. a) Tasa anual de excedencia. b) Probabilidad de excedencia.....	73
56	Contribución al peligro sísmico de cada uno de los segmentos de falla en el sitio donde se ubica el edificio en Tijuana.....	74
57	Contribución al peligro sísmico en La Salina, de todos los segmentos.....	75
58	Contribución al peligro sísmico en el sitio donde se ubica el edificio en Tijuana, de la falla Vallecitos.....	76
59	Contribución al peligro de la falla Vallecitos para el sitio donde se ubica el edificio de Tijuana.....	76
60	Espectro de aceleración de peligro sísmico uniforme para el sitio en donde se ubica el edificio en Puerto Salina.....	77
61	Acelerogramas del sismo de Morgan Hill, registrados en la estación 57382 y elegidos en este trabajo como registro de diseño.....	78

62	Gráfica tripartita del espectro de respuesta calculado con la componente norte sur del registro del sismo de Morgan Hill (línea negra) y su espectro de diseño (línea azul).....	79
63	Espectros de respuesta involucrados en el desarrollo de la tesis.....	80
64	Mapa de la zonificación designada para el estado de Baja California, tomado de las Normas técnicas complementarias del Estado de B.C.	81
65	Diagrama de un edificio. a) Sin deformar, b) deformado, c) diagrama de cuerpo libre.....	84
66	Formas modales de los primeros 4 modos de vibración del edificio....	89
67	Modelo en SAP 2000 del edificio en La Salina. En la parte inferior se muestra la salida (desplazamiento en cm) del nodo 19138. Con una flecha roja se indica la posición del nodo 19138.....	93
68	Salida en el décimo nivel, utilizando la función de transferencia calculada en ese nivel. a) Velocidad absoluta, b) Desplazamiento absoluto, c) Desplazamiento en la base, d) Desplazamiento relativo a la base.....	95
69	Salida en el sexto nivel, utilizando la función de transferencia calculada en ese nivel. a) Velocidad absoluta, b) Desplazamiento absoluto, c) Desplazamiento en la base, d) Desplazamiento relativo a la base.....	95
70	Salida en el tercer nivel utilizando la función de transferencia calculada en ese nivel. a) Velocidad absoluta, b) Desplazamiento absoluto, c) Desplazamiento en la base, d) Desplazamiento relativo a la base.....	96
71	Respuesta en amplitud y fase de las tres componentes del sismómetro Guralp 36749.....	108
72	Respuesta en amplitud y fase de las tres componentes del sismómetro Trillium Compact.....	108
73	Respuesta en amplitud y fase de las tres componentes del sismómetro PMD. Las líneas, azul, roja y negra corresponden respectivamente a las componentes vertical, longitudinal y transversal.....	109
74	Respuesta en amplitud y fase de las tres componentes del acelerómetro Episensor ES-T.....	109
75	Mesa de calibración ER-CT1 usada para la calibración del acelerómetro EST-1.....	110

76	Espectros de Fourier de la prueba realizada a uno de los sensores Episensor. a) desplazamiento de 2 cm, b) desplazamiento de 0.1mm c) desplazamiento de 0.01mm.....	111
----	---	-----

Lista de tablas

Tabla		Página
1	Algunas de las características de la instrumentación sísmica utilizada en la obtención de registros de vibración ambiental en los sitios de interés.....	17
2	Datos reportados en el <i>Global Centroid Moment Tensor Catalog</i> correspondientes al sismo registrado en el edificio de Tijuana.....	20
3	Resultados de los modos de vibración obtenidos en el Capítulo 2.....	35
4	Fallas o Segmentos de fallas utilizados en el análisis de peligro sísmico y algunas de sus características.....	60
5	Resultados obtenidos a partir del desagregado de peligro sísmico.....	82
6	Masas y rigideces para el edificio de Puerto Salina (Díaz, 2009).....	88
7	Frecuencias calculadas de los modos de vibración (componente longitudinal) del edificio en Puerto Salina.....	88
8	Formas modales del edificio de La Salina.....	89
9	Desplazamientos en los pisos.....	90
10	Factores de participación modal.....	90
11	Fuerzas de inercia en cada piso.....	91
12	Fuerzas de cortante en la base de cada nivel.....	91
13	Momentos de volteo.....	92
14	Frecuencias de los modos de vibración del edificio en Puerto Salina obtenidos con SAP2000.....	93
15	Resumen de resultados obtenidos en el Capítulo 4.....	96
16	Algunos parámetros de fallas o segmentos de fallas (Longitud, Profundidad, desplazamiento relativo, a y b de la ley de Gutenberg-Richter, magnitud máxima) obtenidos a partir de una investigación bibliográfica.....	112

Capítulo 1. Introducción

1.1. Zona de estudio

Las ciudades de Tijuana, Rosarito y Ensenada se encuentran en una región tectónicamente activa. El rasgo geológico principal de esta región lo constituyen los sistemas de fallas activos y caracterizados por una continua actividad sísmica, impuesta por el régimen tectónico del sistema San Andrés-Golfo de California (Wong *et al.*, 1986). La actividad tectónica en la región tiene su origen en la interacción de las placas Norteamericana y del Pacífico, las cuales tienen un significativo movimiento relativo (~5 cm/año), lo que produce grandes concentraciones de esfuerzos en la corteza terrestre (Acosta Chang *et al.*, 2009). La zona de influencia (Figura 1) de la interacción entre las placas tectónicas, con dimensión aproximada de 250 km de ancho en la latitud de la ciudad de Tijuana, comprende desde la Falla Algodones, con el sistema San Andrés (al oriente) hasta la Falla San Clemente (aproximadamente a 50 km de la costa) hacia el poniente (Gastil, 1975).

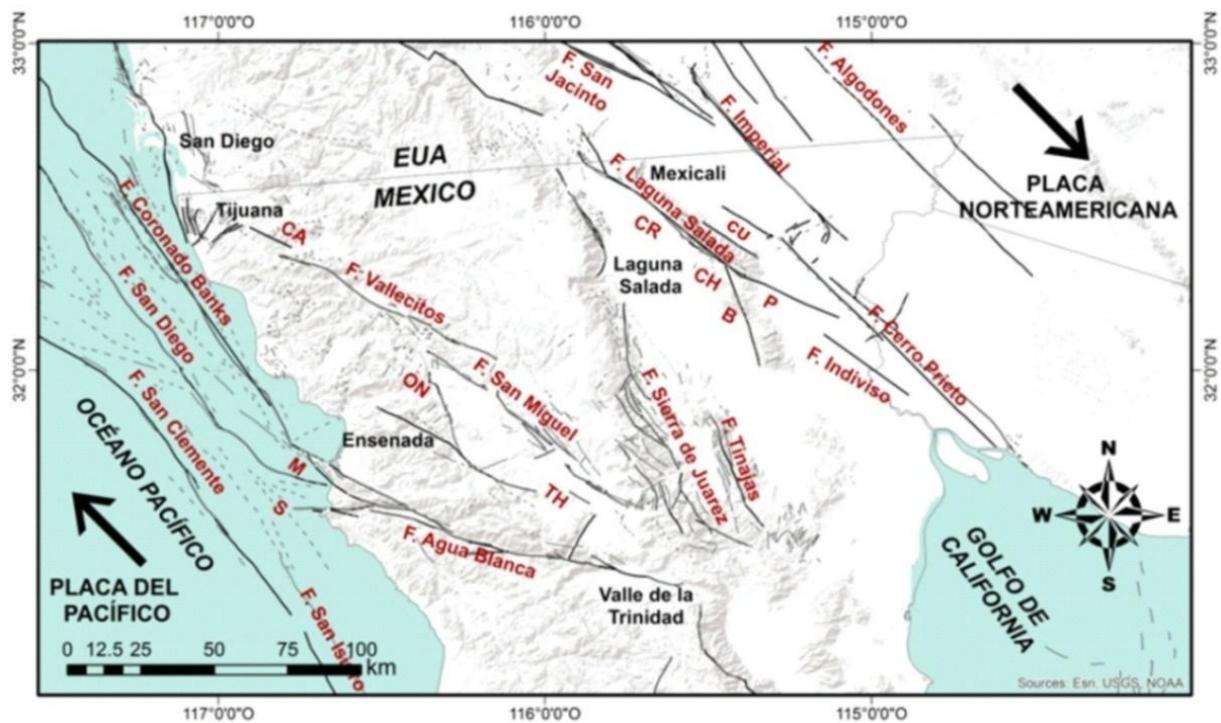


Figura 1. Marco tectónico de la región norte de Baja California y principales fallas asociadas al movimiento relativo de placas. B = Falla Borrego, CA = Falla Calabazas, CH = Falla Chupamirtos, CR = Falla Cañón Rojo, CU = Falla Cucapah, M = Falla Maximinos, ON = Falla Ojos Negros, P = Falla Pescaderos, S = Falla Bahía Soledad y TH = Falla Tres Hermanos.

1.2. Antecedentes de sismicidad

Dentro de los antecedentes de sismicidad en la región, destaca un temblor reciente (sismo El Mayor-Cucapah) ocurrido en la región del valle de Mexicali el 4 de abril de 2010, con magnitud 7.2. Este sismo afectó a la ciudad de Mexicali y fue sentido en todos los municipios del estado de Baja California, del norte de Sonora y en ciudades del sur de California y Arizona, en Estados Unidos.

Además del sismo El Mayor-Cucapah, han ocurrido temblores de distintas magnitudes con epicentros concentrados principalmente en la zona oriente de la región norte de Baja California (Figura 2). Sin embargo, varios temblores con magnitudes apreciables se han originado también en la región central del norte de Baja California. Ejemplos de estos sismos son, el sismo de Guadalupe de 1944 (Magnitud 5.7), los sismos de San Miguel de 1956 (Magnitudes 6.8, 6.4 y 6.3), localizados en el sistema San Miguel-Vallecitos, así como el sismo de 1934 (Magnitud 5.9) asociado a la falla San Clemente, en el borde continental (Figura 3). Estos antecedentes sísmicos indican que no se debe descartar un sismo de magnitud importante en las cercanías de la franja costera del Pacífico del norte de Baja California.

1.3. Acerca del tema

Las ciudades de Tijuana, Rosarito y Ensenada se encuentran ubicadas en una región sísmicamente activa. Aunado a esto, existe un creciente desarrollo de edificios construidos en y entre estas ciudades (sobre todo en la franja costera, Figura 4). Por tanto es importante estudiar el peligro sísmico de la región y los efectos de los sismos en las estructuras. Estos estudios son básicos para un posterior análisis de riesgo sísmico.

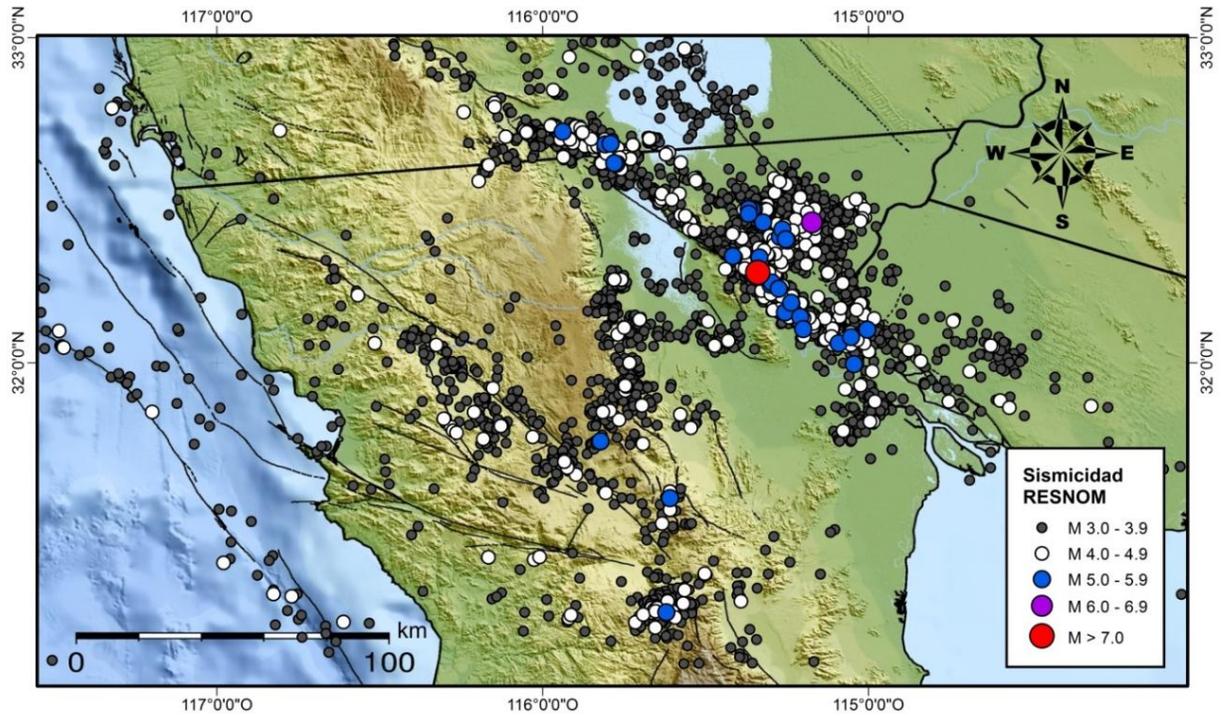


Figura 2. Mapa de temblores con magnitudes mayores o iguales a 3.0, registrados del año 1973 al presente, obtenidos del catálogo de la Red Sísmica del Noroeste de México.

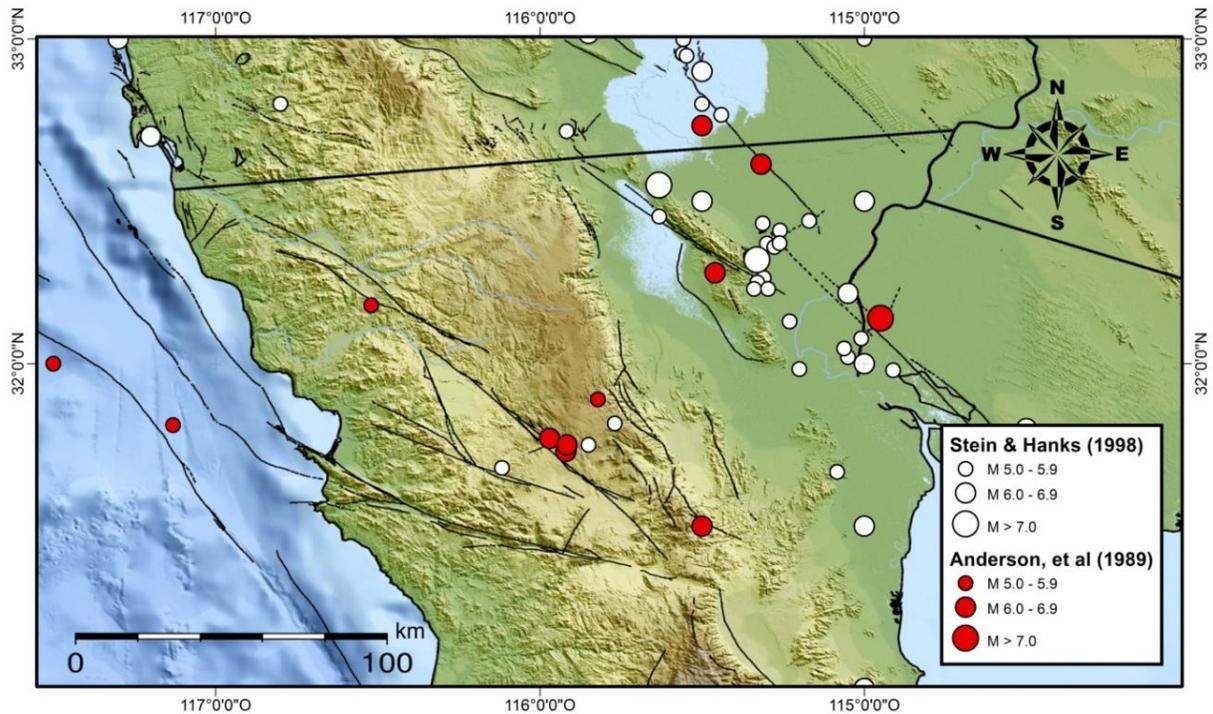


Figura 1. Mapa de sismicidad histórica en la región. En color blanco datos de sismos (de 1800 al 1994) tomados del catálogo publicado por Stein y Hanks (1998). En color rojo sismos (de 1932 a 1986) tomados de Anderson et al., (1989).



Figura 4. Fotografías de edificios tomadas en la franja costera de Baja California (BC):
a) Rosarito, B. C. <http://www.Skyscrapercity.com/showthread.phpt=1159207&page=6>,
b) Popotla, B.C. <http://www.Skyscrapercity.com/showthread.php?t=765834&page=63>,
 fecha de consulta, octubre de 2015.

La respuesta dinámica de una estructura afectada por un movimiento sísmico puede ser estimada por dos métodos. Uno consiste en la caracterización de la respuesta de la estructura (función de transferencia), mediante la separación de las características de la estructura y las características del movimiento en su base. El otro método consiste en definir un modelo teórico tomando en cuenta las características de la estructura, tales como su amortiguamiento, rigidez y masa de cada nivel. Con ambos métodos es posible calcular los desplazamientos producidos en los diferentes niveles del edificio por un movimiento sísmico aplicado en su base. Esto se logra usando acelerogramas de diseño reales o sintéticos.

Un método para seleccionar acelerogramas para el diseño de estructuras, consiste en calcular un espectro de respuesta de peligro sísmico uniforme (USHARS, por sus siglas en inglés). El peligro sísmico se define como la probabilidad de que cierto valor de movimiento del suelo (aceleración pico, aceleración espectral, intensidad de áreas, etc.) sea excedido en un intervalo de tiempo, en un sitio. El USHARS obtenido a partir de un análisis probabilístico de peligro sísmico (PSHA), representa la aceleración espectral con la misma probabilidad de ser excedida en un cierto intervalo de tiempo (10% y 50 años, por ejemplo) para diferentes periodos del movimiento sísmico. El PSHA se basa en el método propuesto por Cornell (1968), en el cual se estiman las probabilidades de excedencia de diferentes parámetros del movimiento del terreno (velocidad, aceleración, aceleración espectral u otro parámetro obtenido a partir de ecuaciones predictivas de movimientos del suelo). Una vez obtenido el USHARS, se realiza una búsqueda de registros sísmicos apropiados en catálogos disponibles. Los registros de sismos cuyas características (distancia epicentral, magnitud, aceleración pico y

duración) concuerden con las obtenidas a partir del PSHA son elegibles. De éstos, aquellos registros cuyos espectros de respuesta presenten la menor desviación estándar con respecto al USHARS, serán los registros seleccionados para usarse como registros de movimientos sísmicos de diseño.

1.4. Estructuras en estudio

1.4.1. Edificio en La Salina

Una de las estructuras civiles que se estudian en este trabajo es un edificio de 12 niveles (Figura 5) ubicado próximo a la carretera Tijuana-Ensenada, km 73, en Puerto Salina, Ensenada, Baja California. El edificio tiene una superficie de construcción de 7981 m², en el cual las dos primeras plantas son asimétricas en ambas direcciones y las plantas del tercero al doceavo nivel son similares y simétricas en una dirección (Figura 6). El edificio cuenta con un sótano, en el cual se encuentran las bombas del sistema hidráulico. De acuerdo a Díaz (2009) el edificio está estructurado a base de columnas prefabricadas, travesaños portantes y de rigidez pretensada, así como muros de concreto reforzado para dar rigidez y resistencia ante cargas accidentales (sismos, viento, entre otros). El sistema de piso es de elementos pretensados y zonas macizas de concreto reforzado de espesor variable. La cimentación que se utilizó fue de pilas coladas en sitio, las cuales se desplantaron a una profundidad de aproximadamente 10 m en un estrato de arena compactada y saturada, ya que el nivel freático se encuentra a 3 m de profundidad (Díaz, 2009).

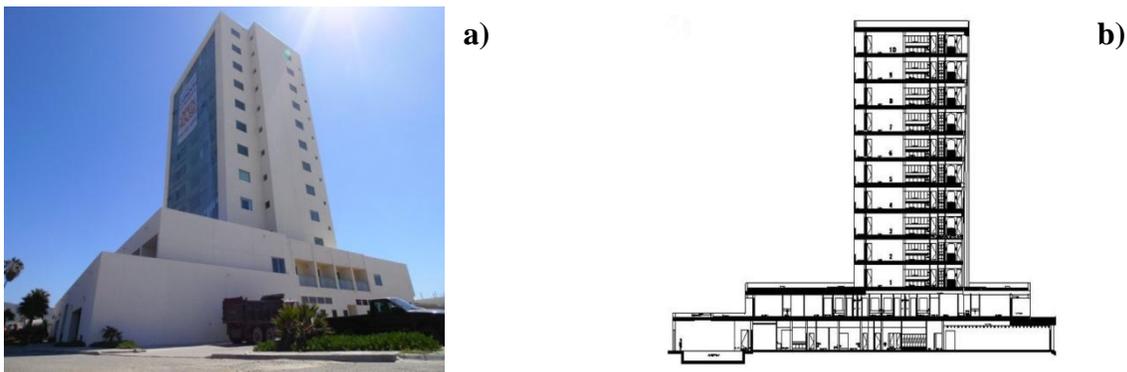


Figura 5. a).Edificio de 12 niveles ubicado en Puerto Salina, BC. b) Corte longitudinal del edificio, tomado de Díaz (2009).

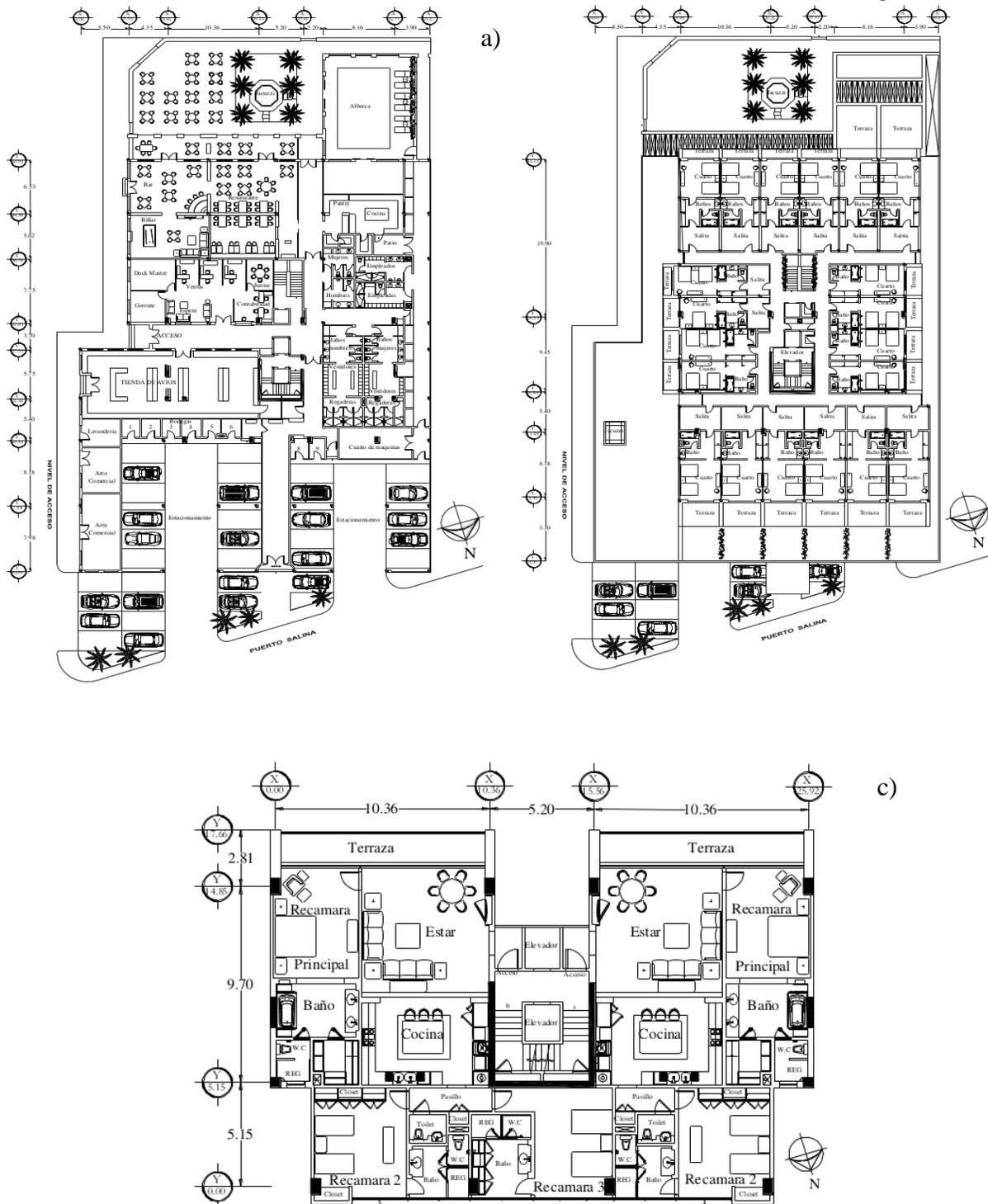


Figura 6. Plantas arquitectónicas del edificio, tomadas de Díaz (2009). a) Planta de primer nivel (asimétrica en ambas direcciones). b) Planta de segundo nivel (asimétrica en ambas direcciones). c) Planta Tipo (similar del tercer al doceavo nivel), simétrica en una dirección.

1.4.2. Edificio en Tijuana

Además del edificio ubicado en Puerto Salina, se estudió un edificio de tres niveles de altura que cuenta también con un sótano (Figura 7). Este edificio, que es sede del Colegio de Ingenieros Civiles y el Colegio de Arquitectos de Tijuana, se ubica en la Zona Río de la ciudad de Tijuana, Baja California. El edificio cuenta con una superficie de construcción de aproximadamente 1200 m². En esta superficie, el sótano y el piso a nivel de calle funcionan como estacionamiento, el segundo nivel funciona como oficinas de los colegios y el tercer nivel es utilizado como salón de eventos.



Figura 7. Edificio sede del Colegio de Ingenieros Civiles de Tijuana y del Colegio de Arquitectos de Tijuana. a) Vista frontal (sureste). b) Vista lateral (noreste).

La zona urbana de la ciudad de Tijuana se encuentra asentada principalmente sobre sedimentos pobremente consolidados de las formaciones San Diego y Linda Vista (**Figura 8**), además de los depósitos aluviales en la zona del río Tijuana y arroyos aledaños (Acosta Chang *et al.*, 2009). Este tipo de geología superficial provoca la amplificación del movimiento del terreno inducido por terremotos, (Acosta *et al.*, 2009).

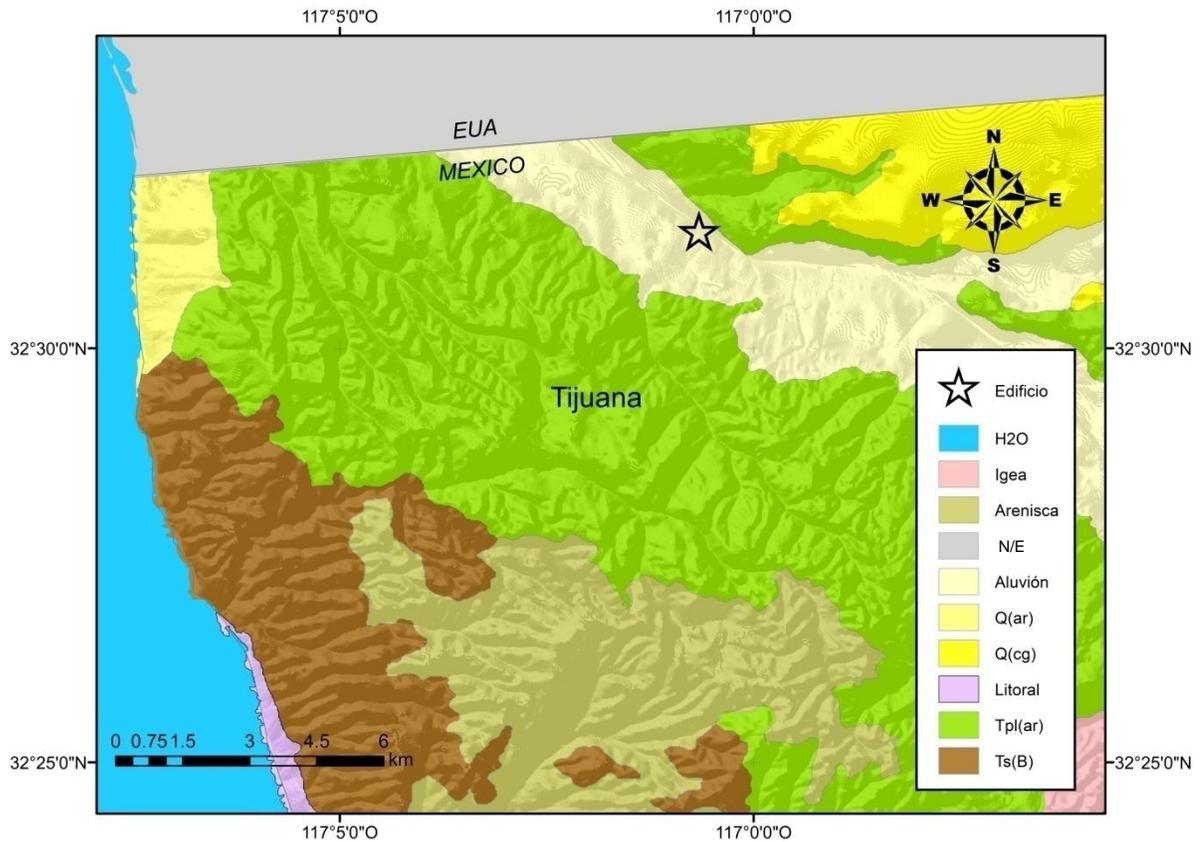


Figura 8. Geología superficial de la zona urbana de la ciudad de Tijuana tomada de Gastil, (1975). Igea = Rocas volcánicas, k(Gr) = Rocas intrusivas félsicas (cretácico), Q(ar) = Arenisca (cuaternario), Q(cg) = Conglomerado(cuaternario), Tpl(ar) = Areniscas y conglomerados (terciario), Ts(B) = Rocas volcánicas (terciario), N/E = No especificada.

1.5. Objetivos

1.5.1. General

Estimar el peligro sísmico imperante en el norte de Baja California, así como el efecto de los movimientos sísmicos sobre dos estructuras de la región.

1.5.2. Particulares

- Obtener registros de vibración ambiental en diferentes niveles de los edificios, así como en campo libre cercano a éstos, utilizando acelerógrafos y sismógrafos.

- Para cada edificio, identificar la frecuencia fundamental de vibración en las gráficas de cocientes espectrales (vertical, longitudinal y transversal) obtenidas mediante el procesamiento y análisis de registros de vibración ambiental.
- Determinar la frecuencia fundamental de vibración del suelo, sobre el cual se desplantan los edificios bajo estudio, usando la técnica de razones espectrales H/V.
- Comparar las frecuencias fundamentales de vibración de los edificios estudiados con respecto a las frecuencias de vibración del suelo sobre el cual se desplantan. Esta comparación tiene el propósito de identificar un posible acoplamiento de las frecuencias de vibración.
- Obtener estimaciones del peligro sísmico en el sitio donde se ubican los edificios. Se utilizarán modelos predictivos de movimientos fuertes, disponibles para la región sur de California. Lo anterior con el fin de calcular las probabilidades de excedencia de aceleración espectral, para el periodo fundamental de vibración de los edificios.
- A partir de las estimaciones de peligro sísmico, obtener un espectro de respuesta de peligro sísmico uniforme para uno de los sitios de interés.
- Seleccionar un registro de aceleración, de catálogos de registros sísmicos disponibles, que tenga las características esperadas para considerarse como el sismo de diseño.
- Determinar la respuesta del edificio ubicado en La Salina a partir de: i) los registros de vibración ambiental, ii) un modelo teórico, iii) el uso de un programa comercial (SAP2000).

Capítulo 2. Vibración ambiental

En el Capítulo anterior se hizo una introducción a la tectónica regional, se explicó la razón por la cual es importante el estudio de la respuesta de estructuras ante movimientos sísmicos y se describieron dos edificios estudiados en este trabajo. Estos edificios fueron seleccionados por la disponibilidad de los propietarios para permitir su instrumentación y por presentar características interesantes para propósitos académicos. El edificio en Puerto Salina es considerablemente más alto que el edificio de Tijuana. Su geometría y sistema estructural es también distinto. La comparación entre los resultados obtenidos a partir del estudio de estos edificios puede servir como referente en futuras mejoras al reglamento de edificación de Baja California.

En general, la respuesta de los edificios ante movimientos del suelo producidos por sismos está gobernada principalmente por parámetros tales como la frecuencia natural y el amortiguamiento de las estructuras. Para el cálculo de estos parámetros, existen métodos como el de razones o cocientes espectrales, que utilizan registros de mediciones de vibración ambiental, vibraciones forzadas o temblores de distintas magnitudes (Huerta *et al.*, 2009). En especial, la frecuencia natural de vibración de un edificio es importante, ya que dependiendo de si ésta coincide con la frecuencia de vibración del suelo sobre el cual se desplanta, los desplazamientos en la estructura pueden amplificarse hasta, quizá, producir el colapso del edificio. En el siguiente capítulo se utiliza el valor de la frecuencia fundamental de vibración de los edificios, para calcular el peligro sísmico, de aceleración espectral en el sitio en donde se ubican y con eso obtener las características esperadas del sismo, o sismos, que contribuyen en mayor medida al peligro sísmico.

En el presente trabajo se utilizaron registros de vibración ambiental en distintos niveles de los dos edificios mencionados y en sitios ubicados en campo libre cercano, con el propósito de obtener los periodos fundamentales de vibración tanto de los edificios como del suelo. El método de vibración ambiental, además de su bajo costo, no es un método invasivo como lo es el de vibraciones forzadas. Las mediciones de vibración ambiental se realizan en periodos de tiempo cortos (horas o incluso minutos, dependiendo de la frecuencia de vibración esperada).

Mientras se efectuaban las mediciones de ruido ambiental, en tres niveles del edificio de Tijuana se registró un sismo de magnitud 6.1 ocurrido en el Golfo de California. Con los sismogramas se obtuvo el periodo de vibración de este edificio, el cual fue comparado con el periodo fundamental obtenido a partir de los registros de vibración ambiental.

2.1. Métodos espectrales

Método de la estación de referencia

Consiste en usar los datos de velocidad o aceleración registrados en dos estaciones (registros de temblores, vibración ambiental o vibración forzada) para calcular la razón entre los espectros de amplitud de las componentes respectivas de movimiento registradas (Borcherdt, 1970).

Al suponer al edificio como un sistema lineal, en donde la entrada es el movimiento sísmico en la base $e(t)$ y la salida $s(t)$ es el movimiento en cada uno de sus niveles (**Figura 9**), tenemos:

En el dominio del tiempo,

$$s(t) = h(t) * e(t), \quad (1)$$

en esta ecuación $h(t)$ es la función de respuesta del edificio.

En el dominio de la frecuencia:

$$S(f) = H(f)E(f), \quad (2)$$

despejando $H(f)$:

$$H(f) = \frac{S(f)}{E(f)}, \quad (3)$$

donde:

$H(f)$ = Función de transferencia en el dominio de la frecuencia.

$S(f), E(f)$ = Espectros de Fourier de la señales de salida y de entrada, respectivamente.

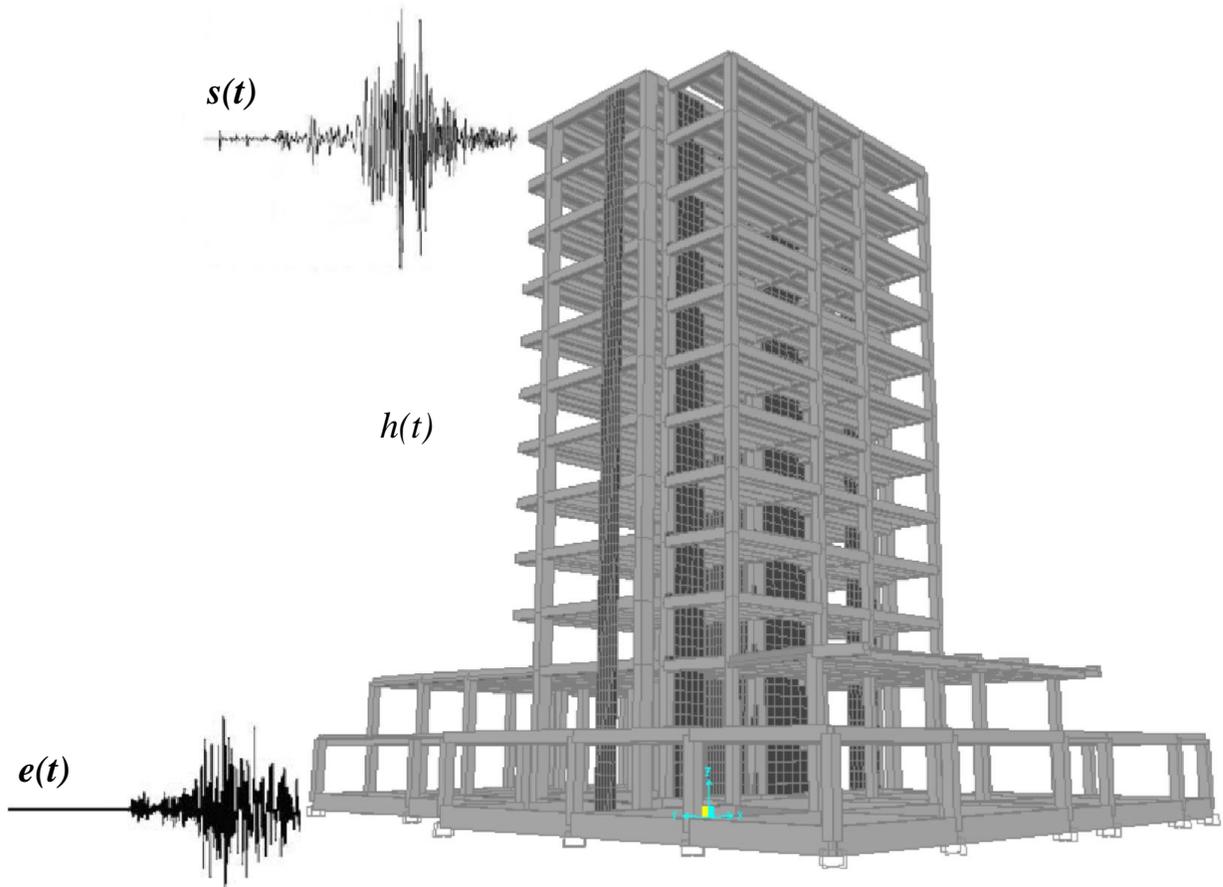


Figura 9. Diagrama del edificio en La Salina BC. En esta figura, $s(t)$ y $e(t)$ son las series de tiempo y $h(t)$ representa la respuesta del edificio.

Se le llama estación de referencia a aquella estación con respecto a la cual se hacen las comparaciones. En este trabajo la estación de referencia es la que se colocó en la base del edificio. Sin embargo pudiera ser cualquiera de las estaciones colocadas en el edificio (Ortiz, 2010).

Los cocientes espectrales se realizan en las tres componentes de movimiento registradas. Es decir, vertical de salida dividida por la vertical de entrada, la longitudinal de salida entre la longitudinal de entrada y transversal de salida entre la transversal de entrada. Como resultado, se obtienen tres funciones de transferencia, una para cada componente de movimiento. Es importante destacar que la función de transferencia únicamente muestra la amplificación entre los niveles del edificio con los cuales se calcula el cociente espectral.

Método de una sola estación.

Se basa en la suposición de que la amplificación del movimiento vertical es considerablemente menor en comparación con la amplificación del movimiento horizontal al pasar a través de secciones de materiales no consolidados (Nakamura, 1989; Lermo y Chávez-García, 1993).

Los espectros de Fourier de las componentes de movimiento horizontal se representan en las ecuaciones 4 y 5.

$$H_S(f) = H_L(f)H_R(f)E_S(f), \quad (4)$$

$$H_B(f) = H_L(f), \quad (5)$$

donde:

$H_S(f)$ = Movimiento en la superficie
 $H_L(f)$ = Movimiento de las fuentes lejanas
 $H_R(f)$ = Movimiento de las ondas de Rayleigh
 $E_S(f)$ = Efecto de sitio en suelos sedimentarios
 $H_B(f)$ = Movimiento en la base

Análogamente se tienen los espectros de Fourier de las componentes de movimiento verticales:

$$V_S(f) = V_L(f)V_R(f), \quad (6)$$

$$V_B(f) = V_L(f), \quad (7)$$

donde:

$V_S(f)$ = Movimiento en la superficie
 $V_L(f)$ = Movimiento de las fuentes lejanas
 $V_R(f)$ = Movimiento de las ondas de Rayleigh
 $V_B(f)$ = Movimiento en la base

La razón espectral $R_E(f)$ (ecuación 8) se aproxima dividiendo el cociente $H_S(f)/H_B(f)$ (para eliminar las fuentes lejanas) entre $V_S(f)/V_B(f)$ (para eliminar las fuentes cercanas).

$$R_E(f) = \frac{H_R(f)E_S(f)}{V_R(f)}, \quad (8)$$

Despejando $H_R(f)E_S(f)$ de la ecuación (4), $V_R(f)$ de la ecuación (6) y sustituyendo en la ecuación (8), ésta se expresa como:

$$R_E(f) = \frac{H_S(f)V_L(f)}{H_L(f)V_S(f)}. \quad (9)$$

Debido a que las polarizaciones horizontal y vertical del ruido sísmico ambiental, en la base de la estratigrafía son similares (Nakamura, 1989), tenemos:

$$R_E(f) = \frac{H_S(f)}{V_S(f)}. \quad (10)$$

En la cual se identifica el periodo dominante del sitio en sedimentos.

El método de Nakamura ha sido utilizado para calcular el periodo fundamental de edificios, teniendo buenos resultados (De Bracia, 2003; Espinoza-Barreras, 1999).

2.2. Cálculo de razones espectrales

Trabajando en el lenguaje de programación MATLAB 2014 y con base en las técnicas de la estación de referencia y de Nakamura, se obtuvieron las razones espectrales en los sitios de acuerdo a lo descrito en la sección 2.1.

Las razones espectrales H/V, son gráficas en las cuales no se puede identificar la amplificación de un sitio (SESAME, 2004), sin embargo, en ellas se puede identificar la frecuencia fundamental del sitio. En el caso de la estación de referencia, las razones representan la amplificación del movimiento de una estación con respecto a otra y en el caso de las razones H/V representan la amplificación de la superficie respecto a la base. A continuación se describen los pasos seguidos para el cálculo de razones

espectrales, los cuales fueron obtenidos de acuerdo a las recomendaciones de SESAME 2004 y a lo descrito en (Kanasewich, 1981) y (Oppenheim y Schafer, 1975).

Primero se realiza un procesado preliminar de las grabaciones de vibración ambiental como se describe a continuación.

- Descargar los datos de las estaciones
- Graficar los datos y revisar su correcta grabación, desechando aquellos datos que no fueron grabados correctamente.
- Tomar las secciones de ruido que contenga menos señales transitorias.
- Remover el valor medio de la señal
- Si los datos que se utilizaron fueron grabados con diferentes equipos, es necesario realizar la corrección por efecto de instrumento. También es necesario realizar este tipo de corrección en los cocientes H/V si el equipo tiene diferente respuesta en sus componentes.

Después se trabaja con una ventana móvil, a la cual en cada segmento se aplica un suavizador cosenoidal y después se calcula la transformada de Fourier. Finalmente se calcula el cociente H/V, o el cociente entre la misma componente de diferentes estaciones y se calcula el promedio de los cocientes espectrales obtenidos (Figura 10).

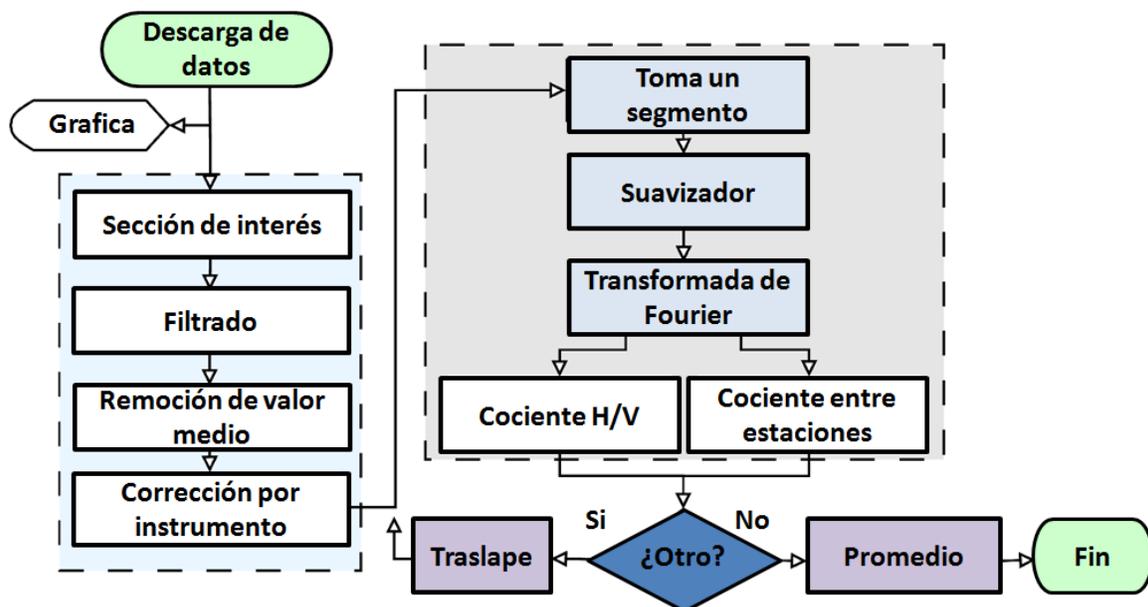


Figura 10. Diagrama que ilustra el procesado de los registros de vibración ambiental (FFT es la transformada rápida de Fourier).

2.3. Instrumentación utilizada

En la Tabla I se muestran algunas de las características de los instrumentos utilizados en la adquisición de los registros de vibración ambiental (Figura 11). En el Anexo I se incluyen las gráficas de respuesta instrumental de cada uno de los sensores utilizados.



Figura 11. Instrumentación utilizada en las mediciones de vibración ambiental. a) Acelerómetro Episensor y Grabadora Reftek, b) Sismógrafo PMD, c) Sismógrafo Sara, d) Sismómetro Trillium Compact y Grabadora Taurus, d) Sismómetro Guralp, grabadora Reftek. Cada equipo se muestra con un dispositivo GPS y su fuente de poder.

Tabla 1. Algunas de las características de la instrumentación sísmica utilizada en la obtención de registros de vibración ambiental en los sitios de interés.

Sensor	Sensitividad del sensor	Digitalizador	Ganancia	Resolución	Sensitividad del digitalizador
	(v/(m/s))			(bits)	(cuentas/ μ v)
Trillium compact	754.30	Taurus	1	24	0.400
Guralp	Vertical 1488.00 Norte 1484.00 Sur 1480.00	Reftek	1	24	0.622
PMD	Vertical 1975.98 Norte 2074.31 Sur 1983.06	PMD	1	24	0.630
Sara	40.00	Sara	1	24	0.192
Acelerometro	Rango completo (g)			(bits)	(cuentas/ μ v)
Episensor	1/4	Reftek	1	24	0.621

2.4. Desarrollo

2.4.1. Mediciones en Tijuana

El 8 de octubre del 2014, en la ciudad de Tijuana BC, se llevaron a cabo las mediciones de vibración ambiental en el edificio del Colegio de Ingenieros y del Colegio de Arquitectos de la ciudad de Tijuana (Figura 12).

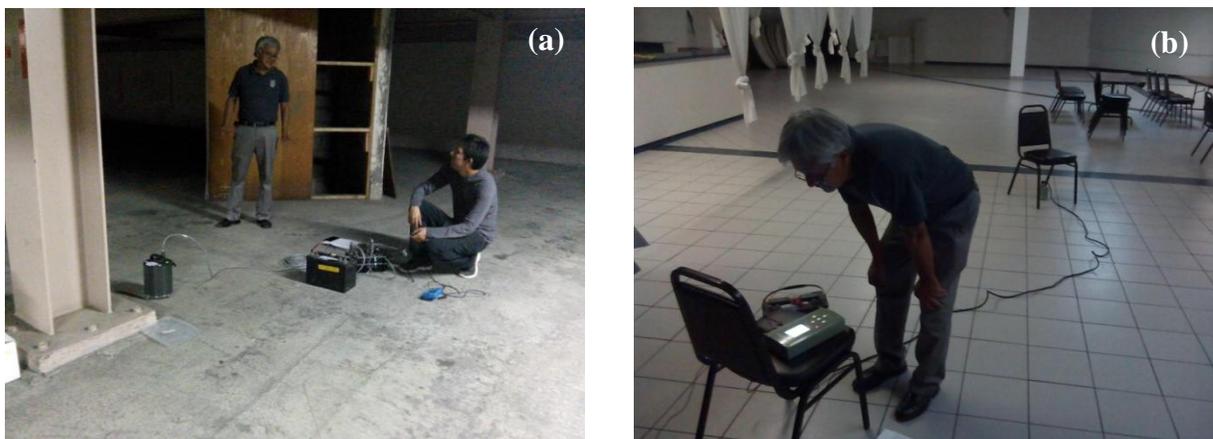


Figura 12. Sismógrafos utilizados para el registro de vibración ambiental en el edificio del Colegio de Ingenieros Civiles y del Colegio de Arquitectos de la ciudad de Tijuana. a) Sensor Guralp y grabadora Reftek colocados en el sótano del edificio. b) Sensor Trillium compact y grabadora Taurus colocados en el tercer nivel del edificio.

Las mediciones se realizaron considerando las recomendaciones de la norma ANSI S2.47-1990 (American National Standard, 1990), la cual provee una guía para la medición de vibraciones en edificios y la evaluación de sus efectos en éstos.

Para la medición de vibración ambiental en este edificio, se instalaron 3 sismógrafos en dos arreglos, tal como se muestra en la Figura 13. Se realizaron mediciones durante aproximadamente 3.5 horas en cada uno de los arreglos. Las mediciones se hicieron de 7:00 pm a 2:00 am, horario durante el cual se esperaba tener menor contaminación en la respuesta del suelo, debida al tránsito vehicular cercano al edificio.

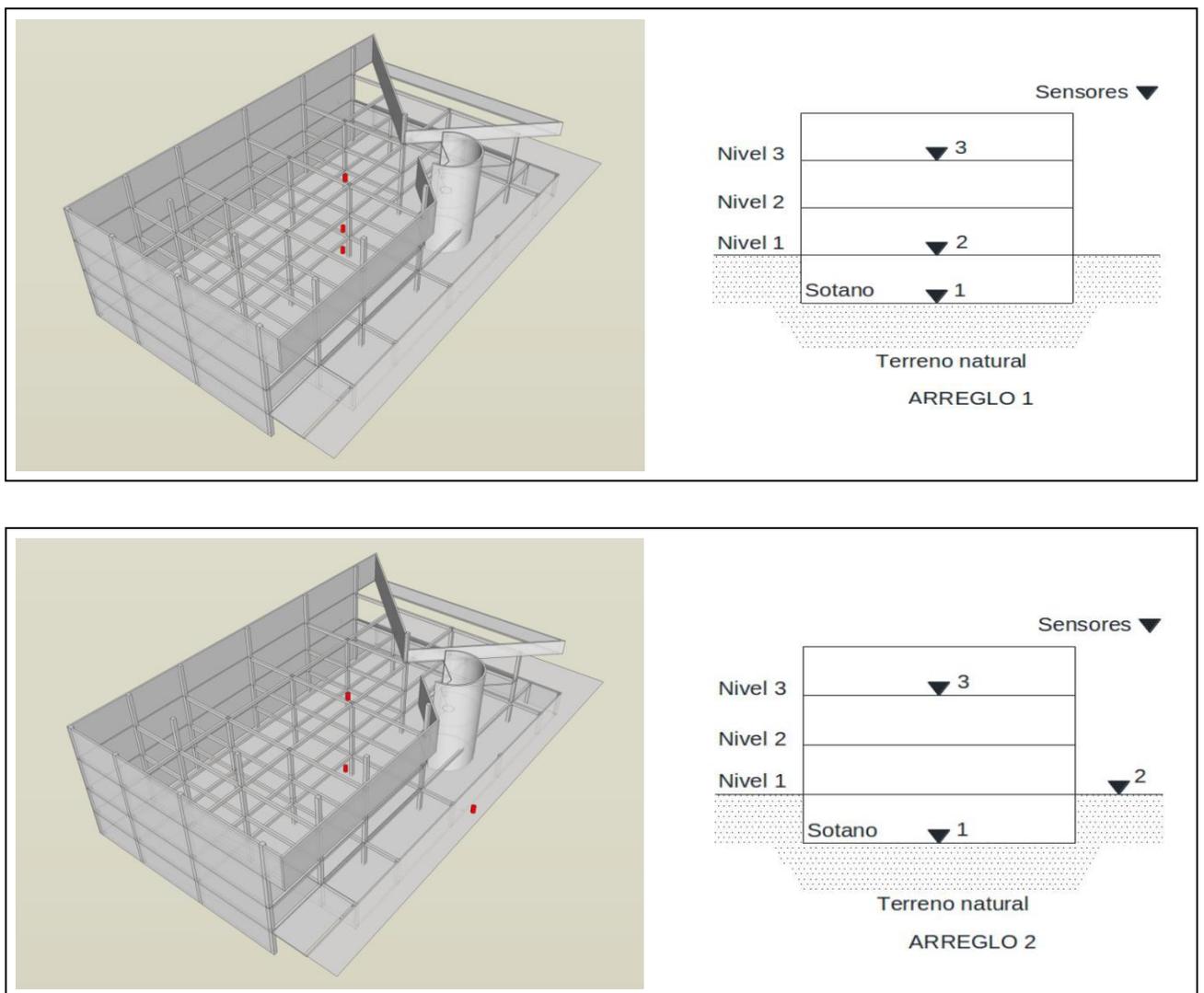


Figura 13. Diagramas que ilustran la posición de los sismómetros en cada uno de los arreglos. Los triángulos invertidos indican la ubicación de los sismógrafos: 1 Guralp-Reftek, 2 PMD-PMD y 3 Trillium-Taurus.

A las 2:44 am del día 8 de octubre del 2014 se registró un sismo de magnitud 6.1 durante la grabación de vibración ambiental en el edificio. El sismo fue registrado en las tres componentes de cada uno de los sensores del arreglo 1 mostrado en la Figura 13. Los sismogramas de este sismo se muestran en la Figura 14. Estos registros están filtrados de 0.01 a 5.0 Hz para hacer resaltar el sismo.

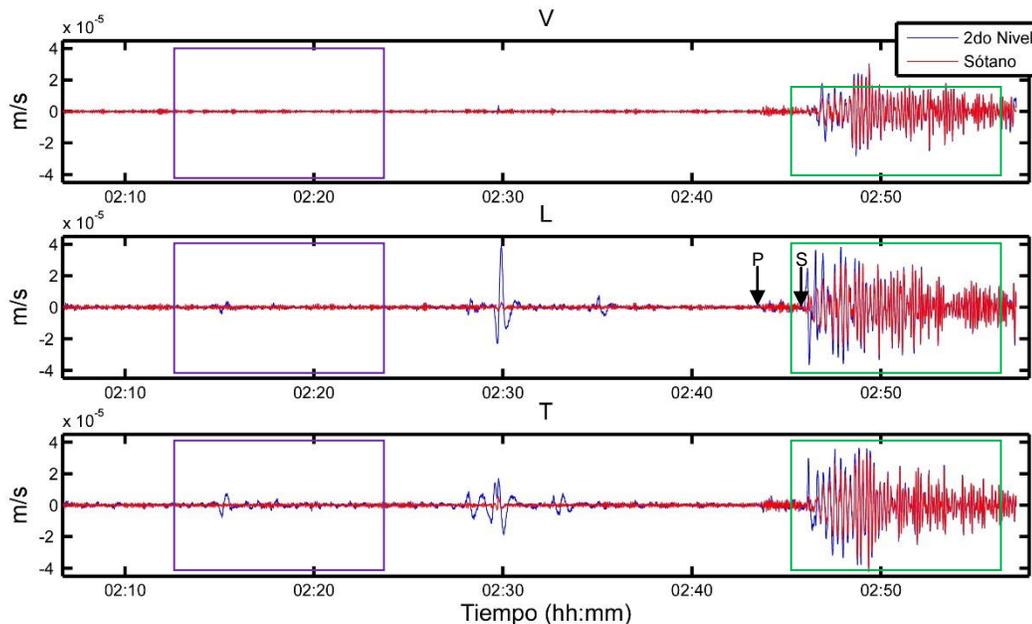


Figura 14. Segmento del sismograma, sin corrección por efecto de instrumento, grabado el día 8 de octubre de 2014 en el edificio de Tijuana. En color rojo se muestran las trazas obtenidas con el sismómetro Trillium Compact, ubicado en el tercer nivel del edificio. En color azul se muestran las trazas obtenidas con el sismómetro Guralp, obtenidas en el sótano. Las flechas indican el arribo de las ondas P y S, y los rectángulos indican los segmentos de vibración ambiental (rectángulo morado) y sismo (rectángulo verde), que más adelante se muestran en el cálculo de la razón espectral.

Según datos del *Global Centroid Moment Tensor Catalog* (disponible en <http://www.globalcmt.org>), el sismo ocurrió el 8 de octubre del 2014 a las 2:40:56.1 en el Golfo de California. El hipocentro se ubicó en las coordenadas: Latitud 23.83, Longitud -108.62 y a una profundidad de 16.3 km (Figura 15). En la Tabla 2 se muestran más detalles del sismo proporcionados en *Global Centroid Moment Tensor Catalog*. Los planos de falla y auxiliar, descritos en esta tabla, indican un fallamiento transcurriente con rumbo de 307° en uno de los planos y 38° en el otro plano.

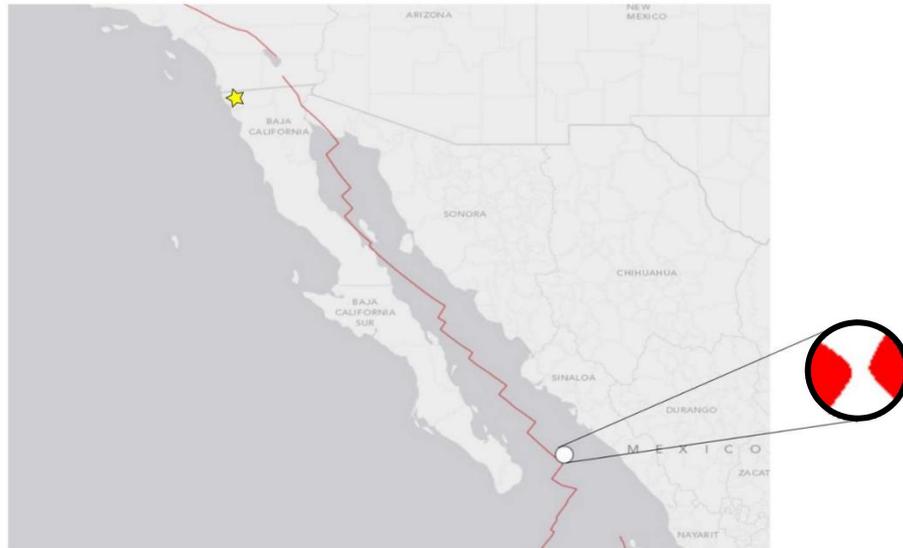


Figura 15. Mapa donde se muestra la ubicación del sismo ocurrido el día 8 de octubre de 2014 (modificado de <http://earthquake.usgs.gov>). La estrella amarilla muestra la ubicación del edificio donde se obtuvieron los registros y el círculo blanco el epicentro del sismo. También se muestra la solución del tensor de momento ("bola de playa") reportada en el catálogo.

Tabla 2. Datos reportados en el *Global Centroid Moment Tensor Catalog* correspondientes al sismo registrado en el edificio de Tijuana.

Datos del sismo	
Ubicación:	Golfo de California
Fecha:	08/10/2014
Hora:	2:40:56.1 GMT
Latitud:	23.83
Longitud:	-108.62
Profundidad:	16.3 km
Magnitud Mw:	6.1
Momento escalar	
Plano 1	
Rumbo:	307°
Echado:	85°
Deslizamiento:	176°
Plano 2	
Rumbo:	38°
Echado:	86°
Deslizamiento:	5°

Las grabadoras Taurus y PMD utilizadas graban los datos en formato *miniseed*, mientras que la grabadora Reftek graba los datos en un formato propio del instrumento, el cual se convirtió a formato *miniseed* mediante el uso de la función *rt_nseed*. Para la

lectura se utilizó la función *reed_mseed* que opera en el ambiente de Matlab. Las siguientes etapas del procesamiento se desarrollaron en este ambiente.

En la reducción de datos, primero se realizó una inspección visual de los registros, con el propósito de verificar su correcta grabación (sin ruido electrónico, con tiempo GMT y con longitud completa de archivos, siendo la misma en las tres componentes). Después se seleccionaron dos segmentos del registro mostrado en la Figura 14, uno que contiene datos de vibración ambiental y otro que contiene una parte del sismo registrado. A cada segmento se le removió el valor medio de la amplitud. Después, ambos segmentos fueron corregidos por efecto de instrumento y convertidos de unidades digitales (cuentas) a unidades físicas (m/s). Lo anterior con base en los valores listados en la Tabla I y las funciones de transferencia mostradas en el Anexo I.

En la Figura 16 se muestran segmentos de la señal que contiene el sismo, en sus componentes Vertical (V), Longitudinal (L) y Transversal (T) al edificio, registrados en el segundo nivel (líneas azules) y en el sótano (líneas rojas), y están filtrados entre 0.05 y 1 Hz para resaltar el sismo. La Figura 17 presenta los mismos segmentos registrados pero sin filtrado. En la Figura 18 se muestran segmentos de vibración ambiental, componentes V, L y T, los cuales, también fueron registrados en el segundo nivel y en el sótano. Como se aprecia en ambas figuras, las amplitudes de los datos obtenidos en el segundo nivel son mayores que las amplitudes de los datos obtenidos en el sótano, siendo menores en la componente vertical.

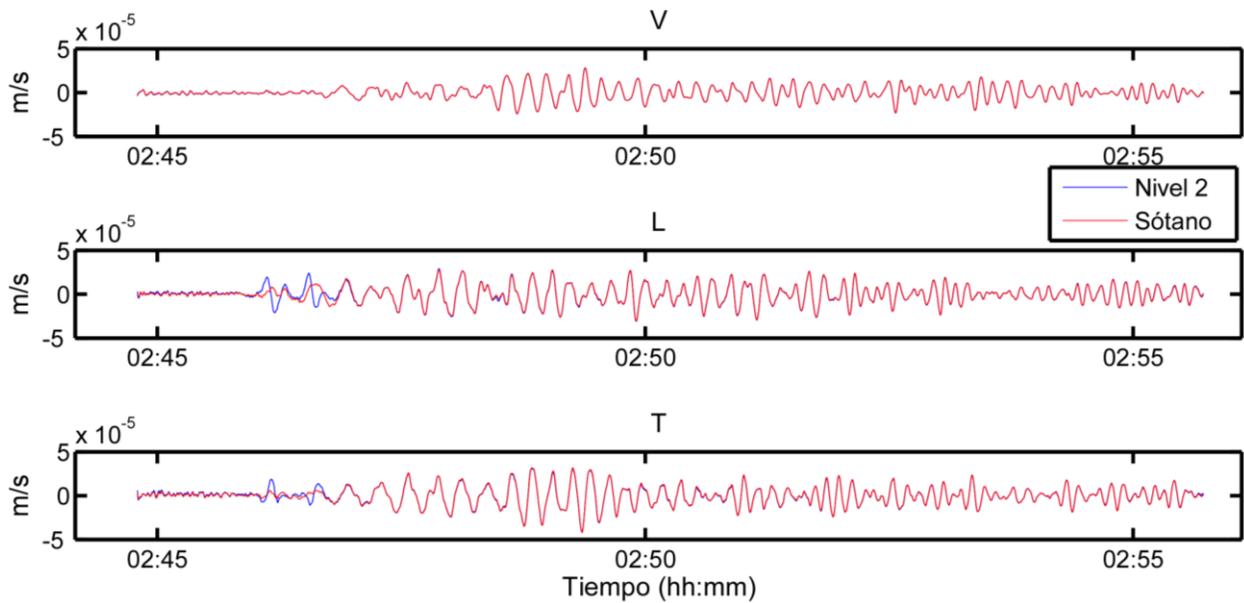


Figura 16. Segmentos del registro del sismo (65536 muestras en cada segmento). La traza azul corresponde al tercer nivel del edificio, mientras que la roja corresponde al sótano. Las trazas han sido corregidas por efecto de instrumento y está filtrado de 0.05 a 1.0 Hz. La secuencia de los sismogramas es Vertical (V), Longitudinal (L) y Transversal (T) al edificio.

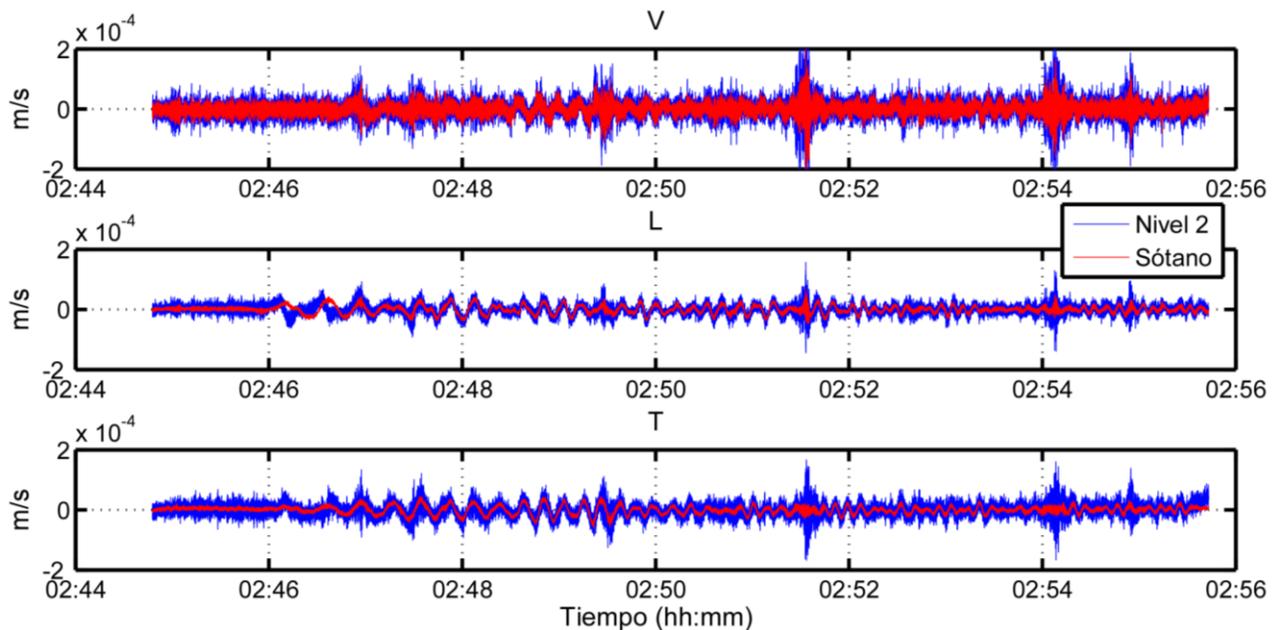


Figura 17. Segmento del registro del sismo, 65536 muestras. La traza azul corresponde al tercer nivel del edificio, mientras que la roja corresponde al sótano. Las trazas han sido corregidas por efecto de instrumento. La secuencia de los sismogramas es Vertical (V), Longitudinal (L) y Transversal (T) al edificio.

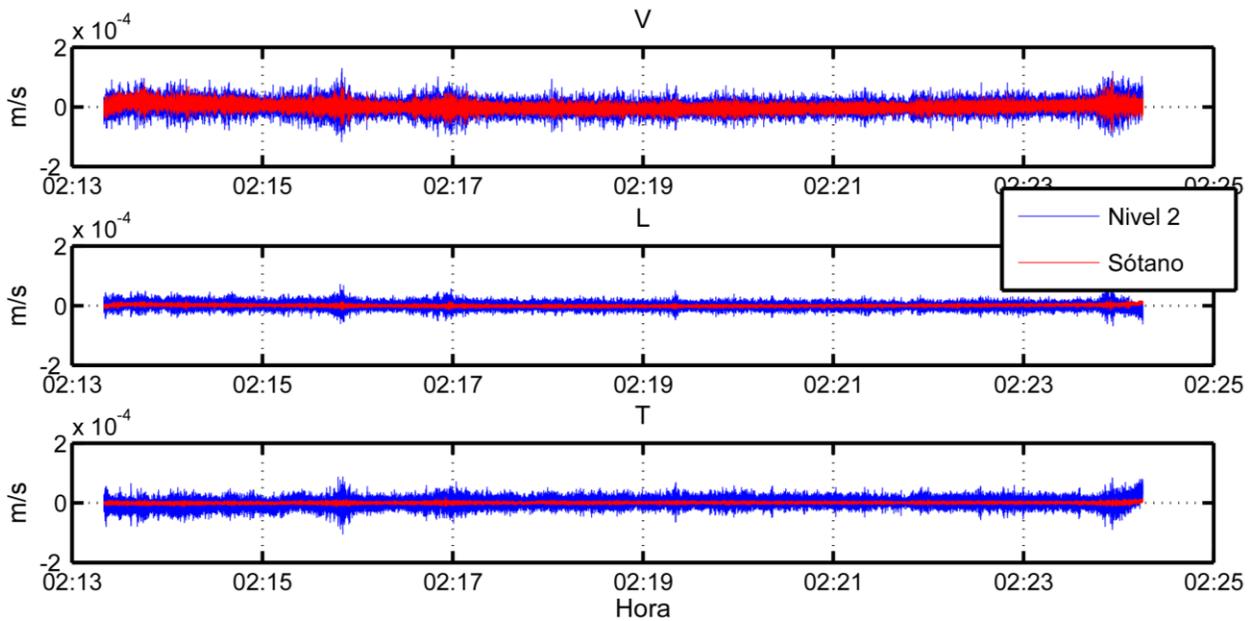


Figura 18. Segmento del registro de vibración ambiental (65536 muestras tomadas a intervalos de 0.01 segundos). La traza azul corresponde al tercer nivel del edificio, mientras que la roja corresponde al sótano. Las trazas han sido corregidas por efecto de instrumento. La secuencia de los sismogramas es Vertical (V), Longitudinal (L) y Transversal (T) al edificio.

Tanto para los registros del segundo nivel como para los del sótano se tomaron 62 segmentos de 4096 muestras, traslapados 25%. A cada uno de los segmentos se les removió el valor medio de su amplitud, después se les aplicó un suavizador cosenoidal (*Taper*) y finalmente se calculó la transformada de Fourier de cada componente. Las Figuras 19 y 20 muestran los promedios de los espectros de amplitud de cada componente, de los registros del sismo y de los registros de vibración ambiental, respectivamente. En estas figuras se nota que la forma de los espectros calculados con el segmento de vibración ambiental, es muy similar a los calculados con el registro del sismo, excepto que para éste último las amplitudes son mayores. En ambas figuras se puede notar un pico en las componentes horizontales del segundo nivel a 5 Hz, el cual no está presente en los espectros del sótano. A 18 Hz se presenta otro pico, pero éste es demasiado impulsivo para ser considerado como alguno de los modos superiores de vibración.

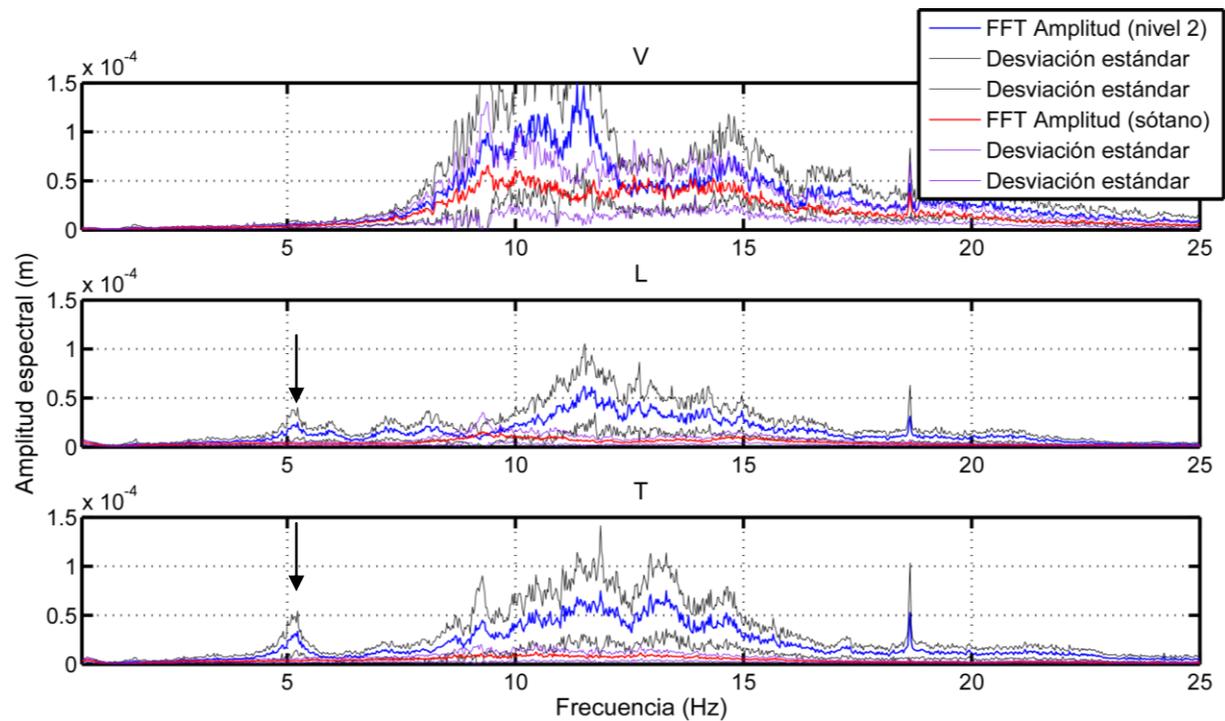


Figura 19. Espectros de amplitud promedio, calculados a partir de 62 segmentos de 4096 muestras de los registros del sismo. El espectro azul corresponde al registro obtenido en el tercer nivel, mientras que el rojo corresponde al registro obtenido en el sótano. La flecha indica un pico observado a 5 Hz, frecuencia que puede ser interpretada como la frecuencia fundamental de vibración del edificio.

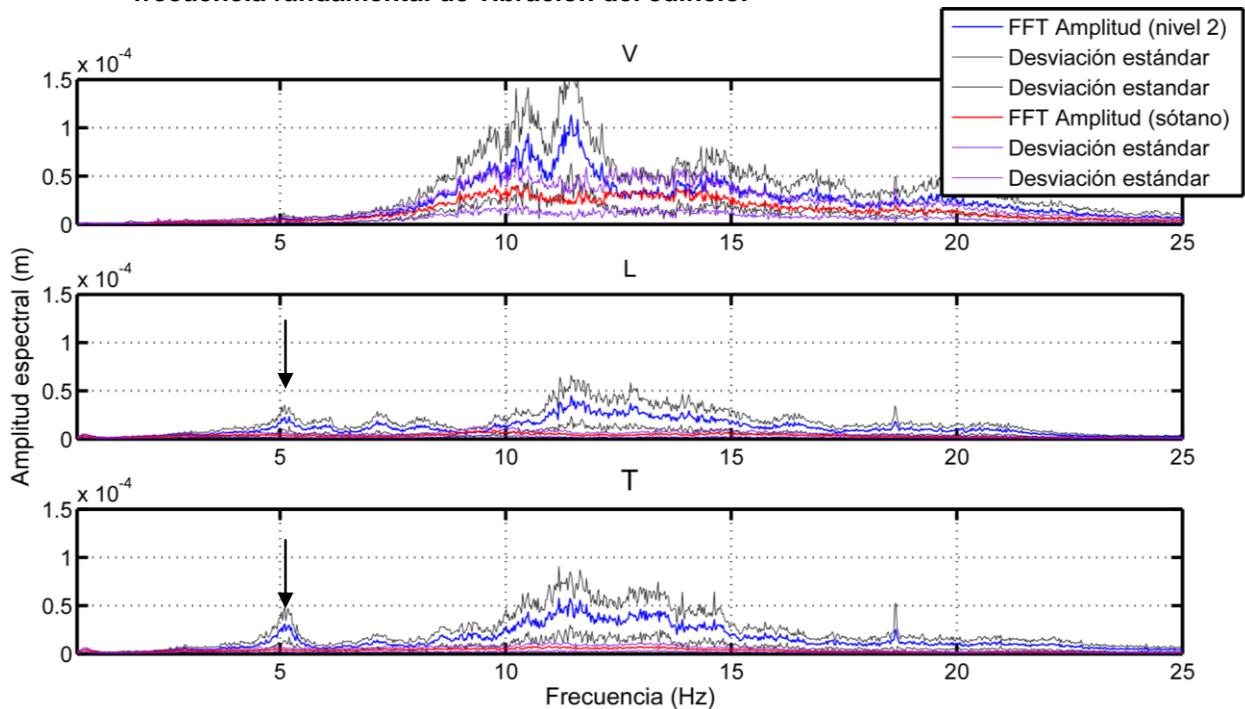


Figura 20. Espectros de amplitud promedio, calculados a partir de 62 segmentos de 4096 muestras de vibración ambiental. El espectro azul corresponde al obtenido con el registro del tercer nivel, mientras que el rojo corresponde al obtenido del registro del sótano. La flecha indica el pico observado a 5 Hz en la figura anterior.

Para cada uno de los segmentos del registro se calculó el cociente de la amplitud espectral del segundo nivel entre la amplitud espectral registrada en el sótano. Los promedios de estos espectros se muestran en las Figuras 24 y 25 y se discuten en la sección 2.5. Se aplicó, además, la técnica de razones espectrales H/V utilizando los registros de vibración ambiental obtenidos en campo libre, sótano, primero y segundo nivel.

2.4.2. Mediciones en La Salina

El siete de octubre del 2014 se llevaron a cabo las mediciones de vibración ambiental en el edificio ubicado en La Salina BC (Figura 5). Las mediciones se hicieron siguiendo las recomendaciones de la norma ANSI S2.47-1990 (American National Standard, 1990). Se colocaron cuatro acelerógrafos (sensores Episensor con grabadoras Reftek) en el interior del edificio. Estos equipos se ubicaron en el onceavo, sexto, tercero y primer nivel. Su posición en planta fue lo más cercana posible al centro de masas del edificio (Figura 22). También se colocaron seis sismógrafos (sensores y grabadoras Sara) en los niveles onceavo, décimo, sexto, quinto, tercero y en el sótano, en la misma posición, visto en planta, que los acelerógrafos, al lado de éstos y con una separación aproximada de 20 cm. En la Figura 21 a) se muestra su colocación. Además, se colocaron dos sismógrafos (Sara y PMD) y un acelerógrafo (sensor Episensor con grabadora Reftek) en campo libre, aproximadamente a 50 m del edificio. Los 12 sensores grabaron simultáneamente durante aproximadamente tres horas. Fotografías de la colocación de los sensores en campo libre se muestran en la Figura 21 b).



Figura 21. Colocación de sensores: a) en campo libre y b) dentro del edificio.

Los registros de las grabadoras Reftek fueron convertidos de formato nativo Reftek a formato *miniseed*. Las grabadoras Sara graban en formato *miniseed*. Los registros fueron leídos en el lenguaje de programación Matlab para su procesado.

Se calcularon razones espectrales de acuerdo a lo descrito en el diagrama de la Figura 10. En el caso de los cocientes espectrales entre niveles del edificio, no se realizó la corrección por efecto de instrumento. Esto se debió a que los sismómetros Sara tienen la misma respuesta en todas sus componentes. Por tanto, el efecto instrumental se cancela al estar presente tanto en el denominador como en el numerador de los cocientes espectrales H/V en campo libre. Solo se realizó la corrección por efecto de instrumento en el caso de los registros obtenidos con sismómetro PMD, ya que éste tiene una respuesta diferente en cada una de sus componentes.

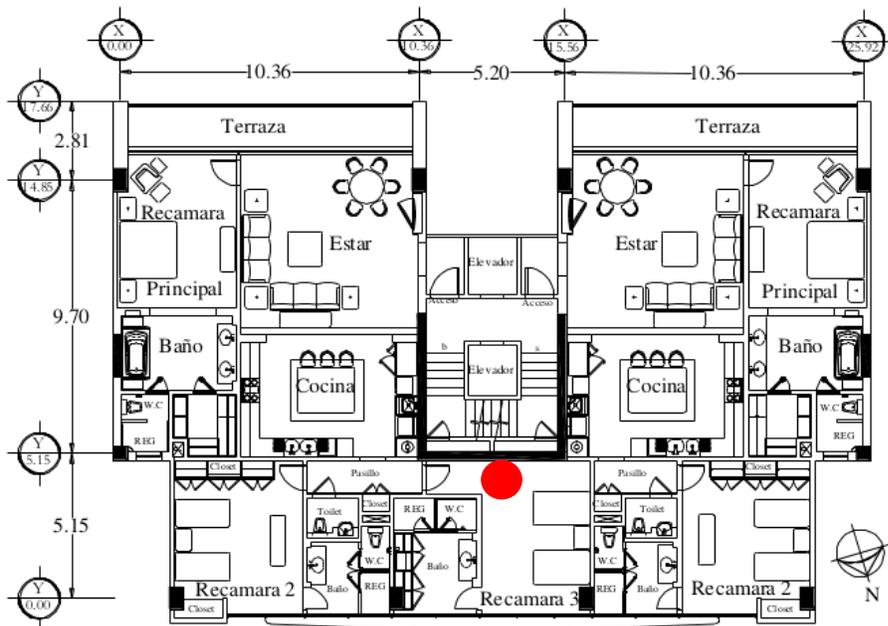


Figura 22. Ubicación de los sensores dentro del edificio en los niveles 3, 5, 6, 10 y 11 (círculo rojo).

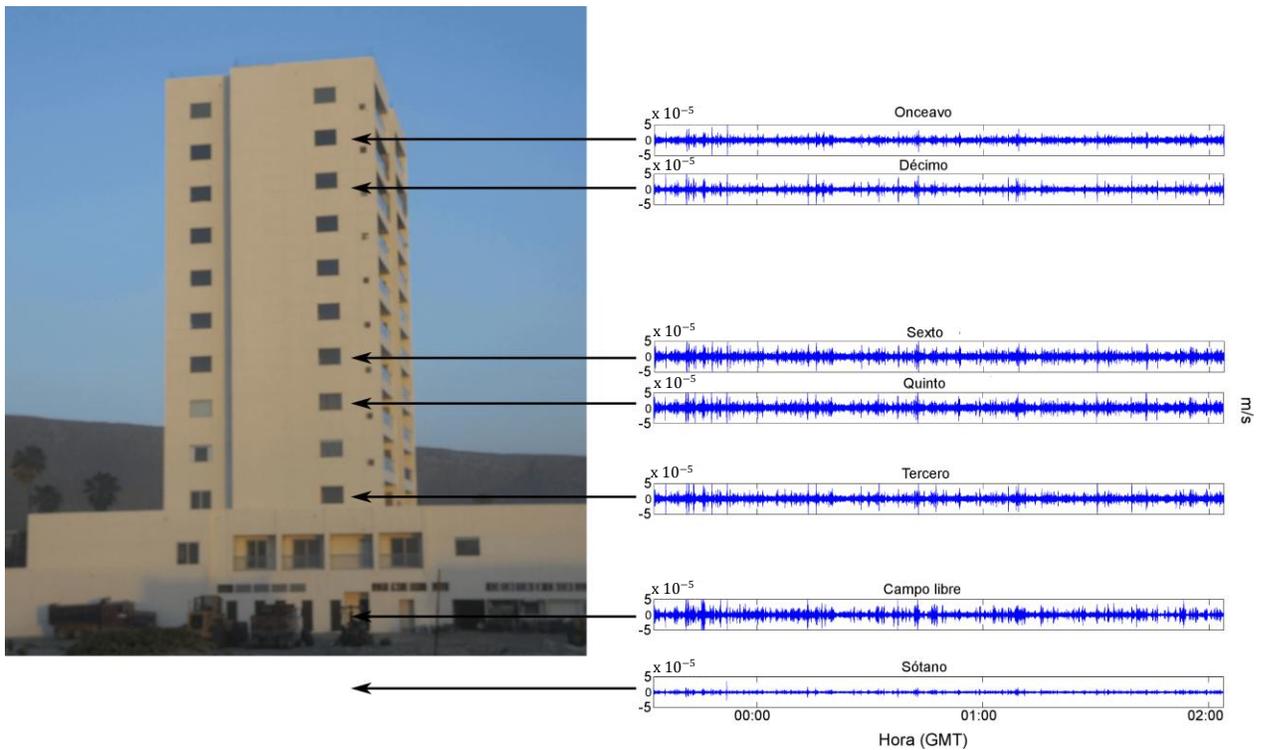


Figura 23. Registros de vibración ambiental obtenidos en distintos niveles del edificio y campo libre. La escala vertical en cada una de las gráficas va desde -5×10^{-5} a 5×10^{-5} .

2.5. Resultados

2.5.1. Resultados de las mediciones en Tijuana.

De acuerdo al desarrollo de las mediciones en Tijuana, descrito en la sección 2.4.1, se obtuvieron los resultados descritos a continuación. Las Figuras 24 y 25 muestran que las formas de los cocientes espectrales obtenidas al utilizar los registros del sismo y de vibración ambiental son muy parecidas. Los cocientes de las figuras se calcularon con los espectros de Fourier de las siguientes componentes de movimiento:

V_2 = vertical en el segundo nivel

V_S = vertical en el sótano

L_2 = longitudinal en el segundo nivel

L_S = longitudinal en el sótano

V_2 = transversal en el segundo nivel

V_2 = transversal en el sótano

En la Figura 24, el cociente espectral de la componente longitudinal muestra tres picos predominantes a las frecuencias de 5.2, 7.8 y 11.6 Hz, mientras que en la componente longitudinal de la Figura 25 estos picos también aparecen, pero están menos definidos. En la componente transversal de ambas figuras (24 y 25) Se puede notar un pico a 5 Hz, sin embargo después, entre 11 y 23 Hz también hay valores altos.

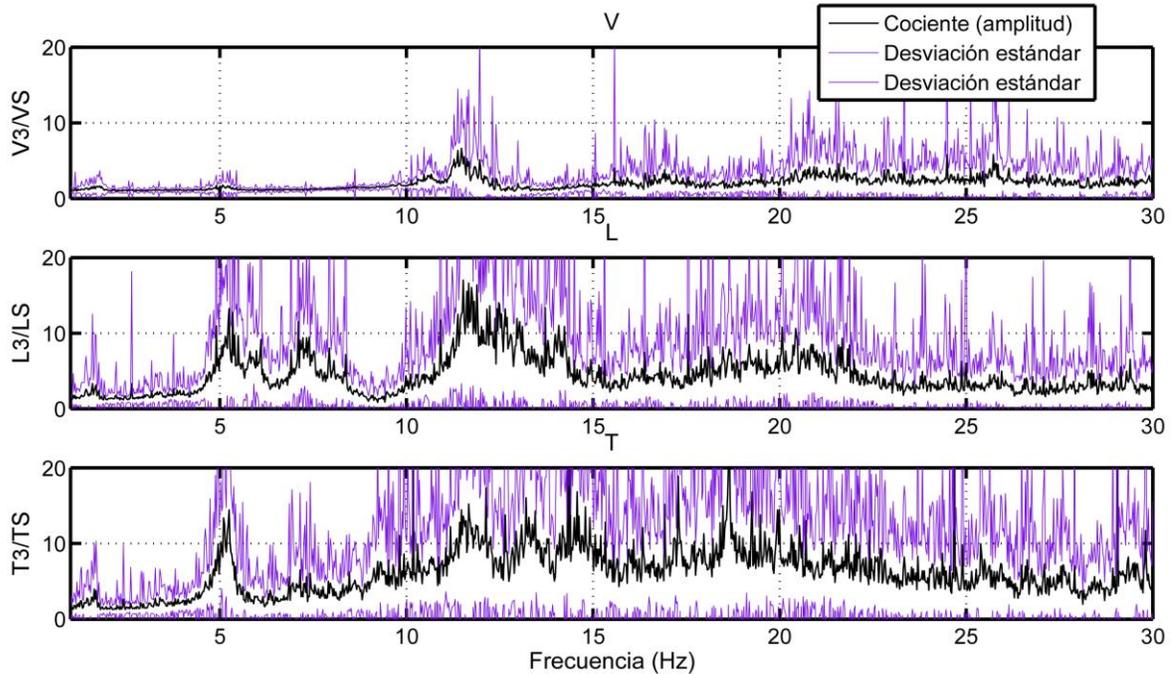


Figura 24. Cocientes espectrales V_3/V_S , L_3/L_S y T_3/T_S , calculados del registro del sismo.

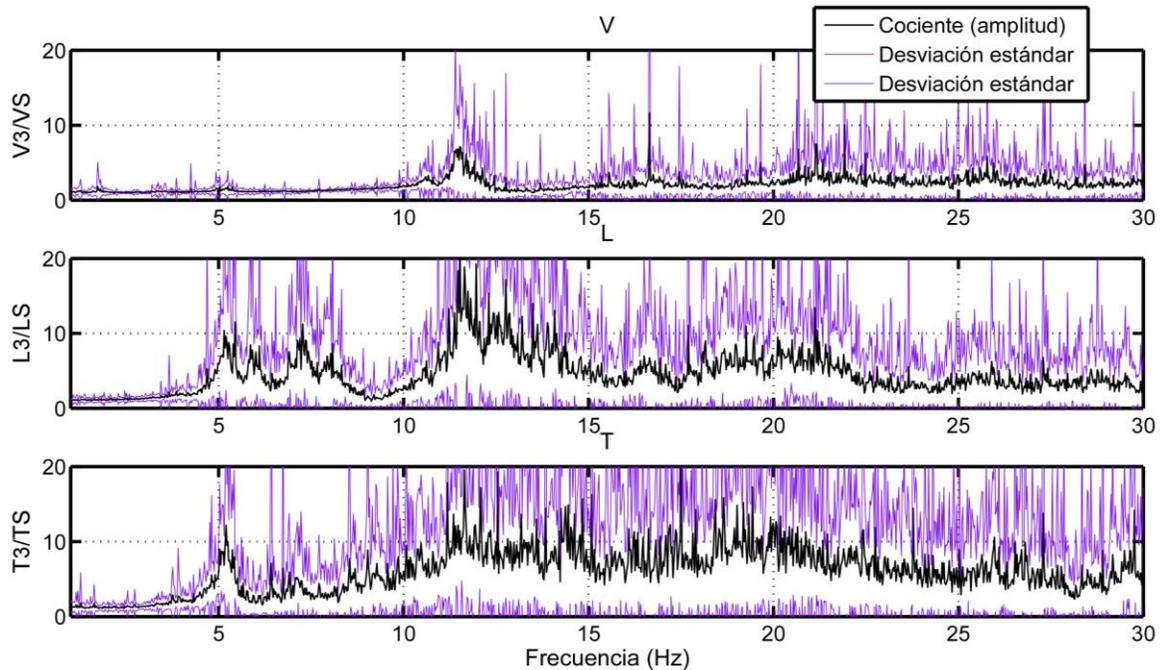


Figura 25. Cocientes espectrales V_3/V_S , L_3/L_S y T_3/T_S , calculados del registro de vibración ambiental.

El resultado del uso del método de razones espectrales H/V en campo libre, sótano, primer nivel y tercer nivel, se muestra en la Figura 26. En los cuatro casos se observa un pico a 0.6 Hz. Sin embargo, en el caso del cociente obtenido a partir de los datos registrados en el segundo nivel, se puede observar otro pico que sobresale a 5.0 Hz. Este coincide con el pico bien definido en la componente transversal, y con uno de los picos observados en la componente longitudinal, calculados mediante el cociente de los espectros del segundo nivel y el sótano del edificio (Ver las Figuras 24 y 25). En estas figuras podemos notar que la amplificación del movimiento obtenida con el segmento de vibración ambiental es similar a la obtenida utilizando el segmento del sismo. Con base en esto, se concluye que la frecuencia del primer modo de vibración del edificio de tres niveles ubicado en Tijuana es de alrededor de 5 Hz, mientras que la frecuencia predominante del suelo es de ~ 0.6 Hz. Por lo tanto la frecuencia de vibración del edificio no entraría en resonancia con la frecuencia de vibración del suelo.

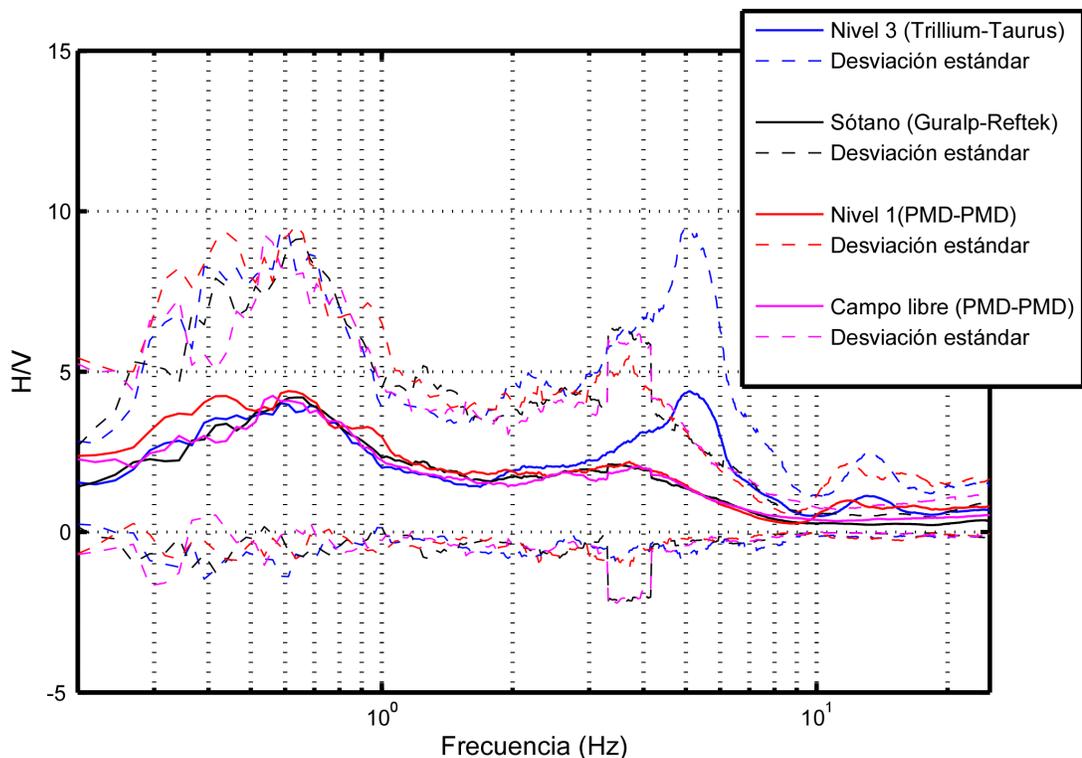


Figura 26. Cocientes H/V calculados a partir de registros de vibración ambiental obtenidos en campo libre, sótano, y niveles 1 y 3.

2.5.3. Resultados de las mediciones en Puerto Salina

La Figura 27 muestra los cocientes espectrales del décimo nivel y el sótano de las componentes vertical, longitudinal y transversal. Podemos notar que la amplificación en la componente vertical es considerablemente baja en comparación con la de las componentes horizontales, en las cuales se distinguen picos bien definidos. En la componente longitudinal podemos identificar un pico a 2.12 Hz, mientras que en la componente transversal notamos picos a frecuencias de 1.9 Hz y 2.8 Hz. En ambas componentes horizontales las frecuencias más bajas pueden interpretarse como la frecuencia del modo fundamental de vibración del edificio en cada dirección. En la componente transversal, sin embargo, el segundo pico (a 2.8 Hz) se encuentra a una frecuencia demasiado cercana al primero, por lo que no se cree que sea el segundo modo de vibración. Una hipótesis es que debido a que el sensor no se colocó exactamente en el centro de masas, éste registra el movimiento debido a la torsión del edificio. Resultados similares a éste han sido reportados en la literatura (ver por ejemplo a Henao, 2013).

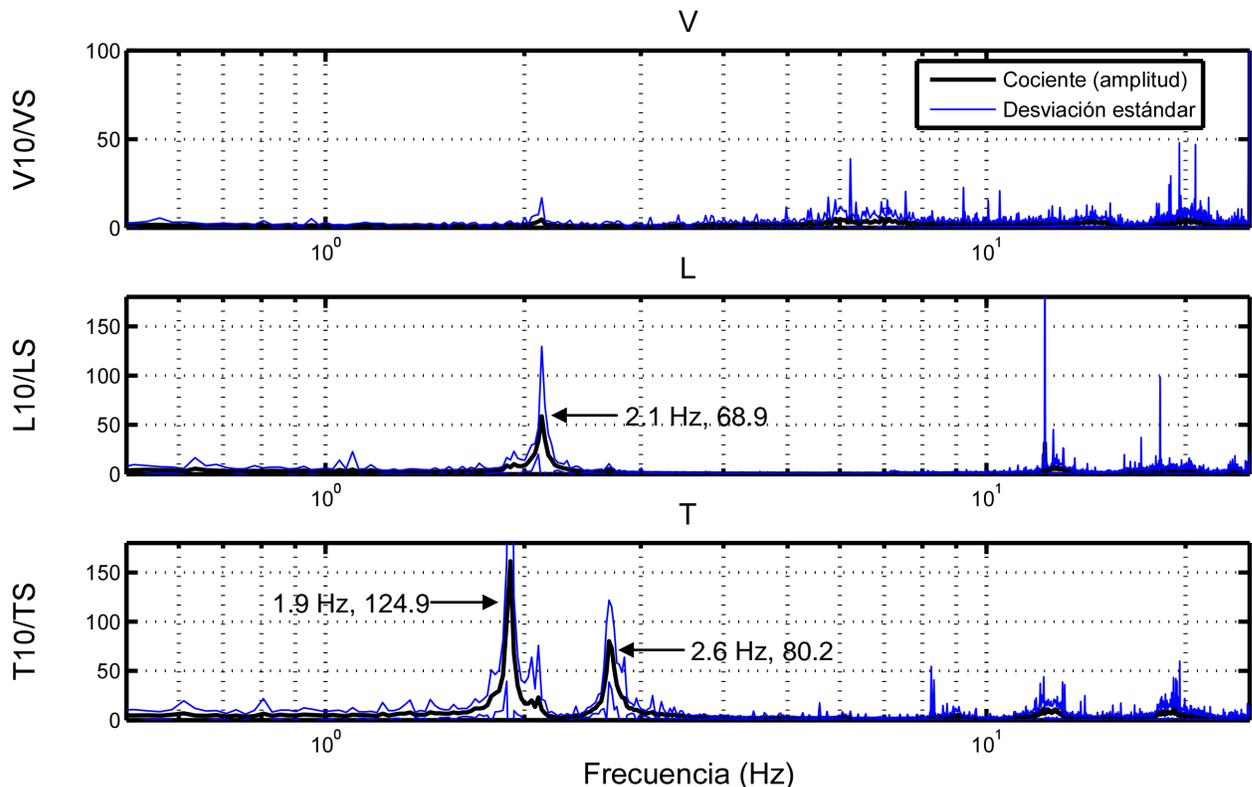


Figura 27. Cocientes de los espectros registrados en el décimo nivel y en el sótano, para las componentes vertical, longitudinal y transversal.

Es importante destacar que en la función de transferencia obtenida se identifican el primer y segundo modo de vibración del edificio. Para calcular las formas modales y la respuesta completa, existen métodos como el de descomposición en valores singulares (Ortiz, 2010), que también utiliza registros de vibración ambiental, vibraciones forzadas o sismos. En el Capítulo 4 de esta tesis se calcularon las formas modales, los desplazamientos y las fuerzas en la estructura debido a un sismo de diseño.

En la Figura 28 podemos notar que los picos observados en los cocientes espectrales del décimo nivel respecto al sótano se encuentran presentes en los cocientes espectrales del sexto nivel entre sótano, quinto nivel entre el sótano y tercer nivel entre el sótano. La rigidez vertical de un edificio es considerablemente más alta en el sentido vertical que en los horizontales. Por geometría, la rigidez de un edificio es mayor en el sentido longitudinal que en el transversal. Por esto la amplificación del movimiento horizontal es mayor que la del vertical y similarmente para el movimiento transversal comparado con el longitudinal. También notamos que conforme los cocientes espectrales se calculan entre un nivel más bajo del edificio y el sótano, las amplitudes de los picos disminuyen, lo cual coincide con lo esperado para la forma gráfica del modo fundamental de vibración del edificio. Los picos observados a frecuencias superiores a 5 Hz aumentan su amplitud en los pisos centrales y disminuyen en los extremos superior e inferior, lo cual corresponde con la forma esperada para el segundo modo de vibración del edificio.

Cocientes Espectrales (amplitud)

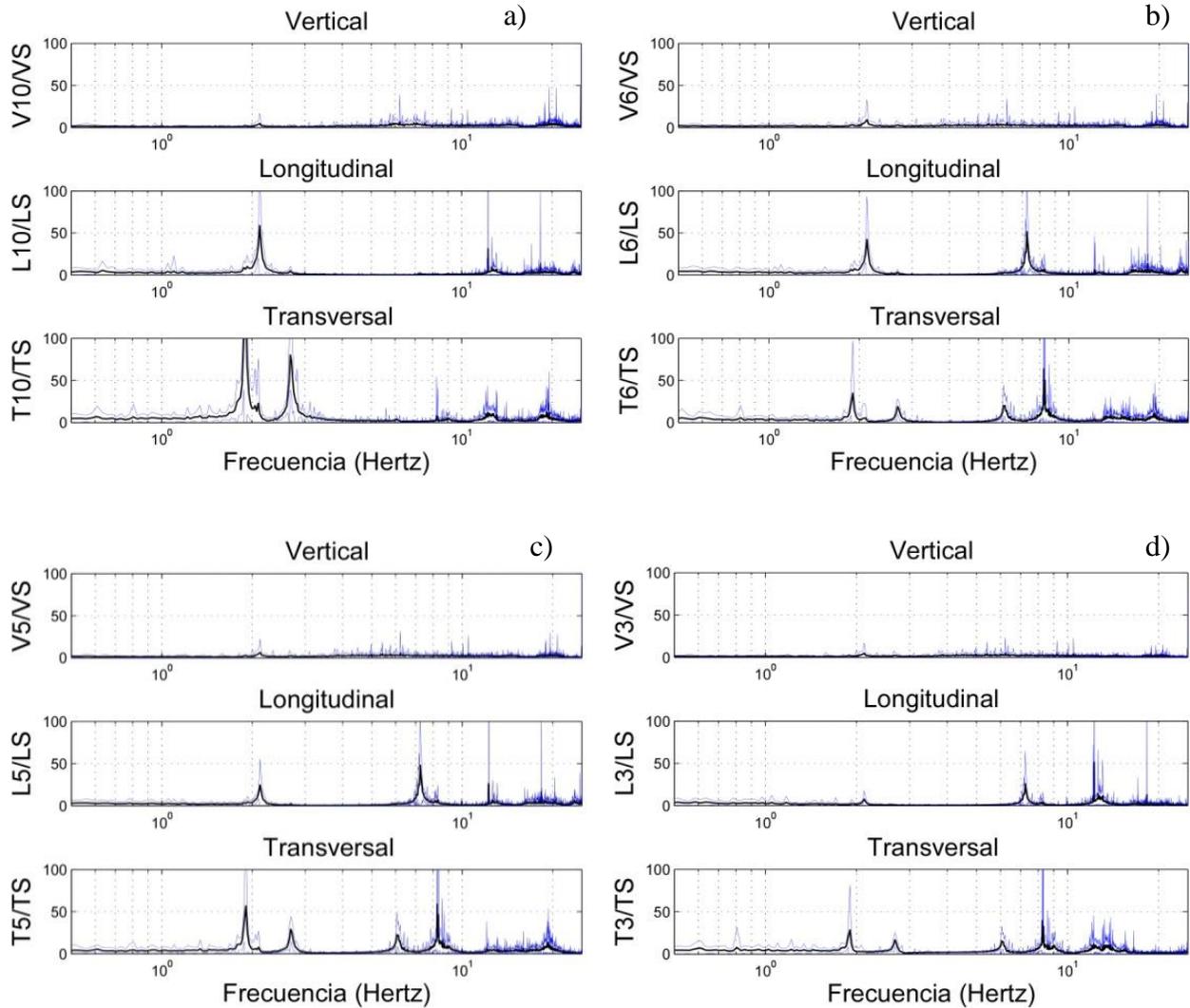


Figura 28. Cocientes espectrales, obtenidos a partir de registros de vibración ambiental de distintos niveles del edificio. a) Décimo nivel entre el sótano, b) sexto nivel entre el sótano, c) quinto nivel entre el sótano y d) tercer nivel entre el sótano. Las líneas negras corresponden a los cocientes espectrales (amplitud), mientras que las líneas azules representan la desviación estándar.

Por otro lado, no se observó ninguna frecuencia de vibración predominante en los cocientes espectrales calculados de registros de los sensores de aceleración colocados en el edificio. En la Figura 29 se muestran estos cocientes.

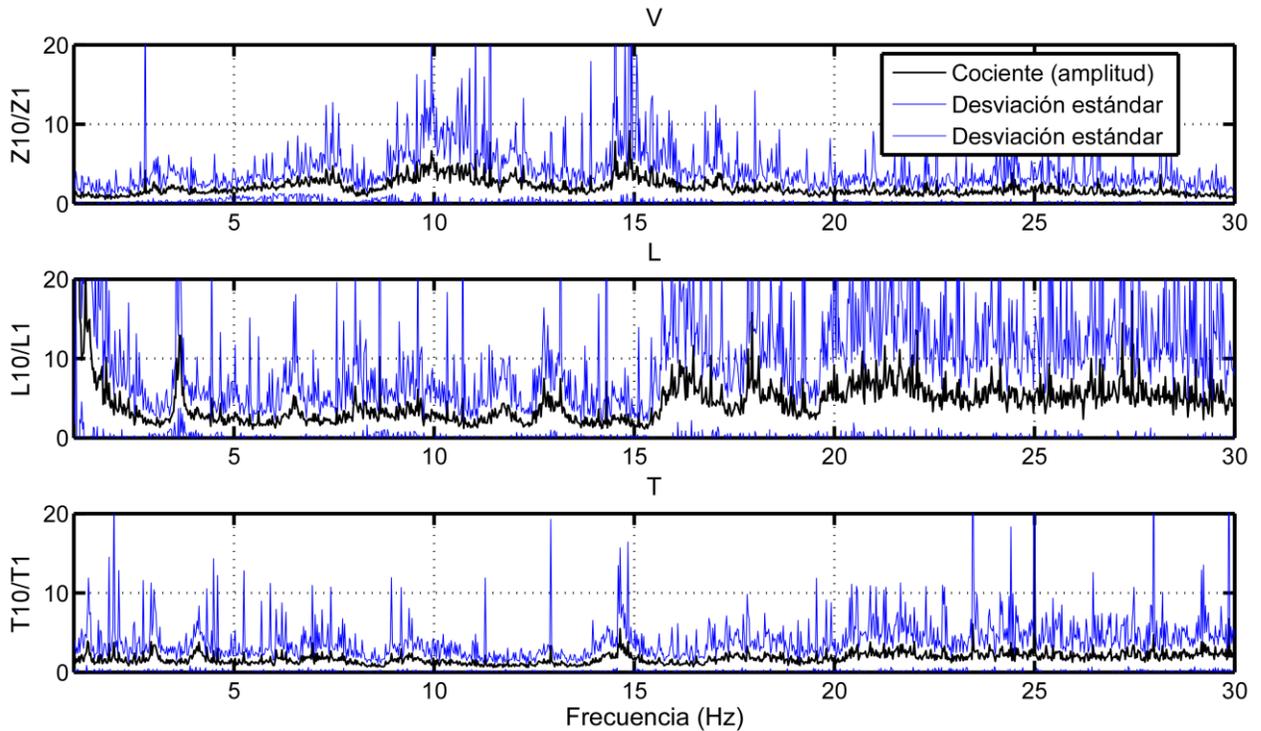


Figura 29. Razones espectrales del décimo nivel entre el sótano para las componentes vertical, longitudinal y transversal calculados a partir de los registros de aceleración.

En la Figura 30 se muestran los resultados obtenidos a partir de los registros de vibración ambiental, obtenidos en el sitio próximo al edificio de Puerto Salina (mencionado en la sección I.3.1). En la gráfica observamos que las curvas obtenidas a partir de los registros de velocidad muestran dos picos. El primero se observa a 1.2 Hz y tiene una amplitud de 6.9. El segundo pico, con amplitud de 2.8, se encuentra a 3.2 Hz. Por otro lado, en la curva obtenida a partir de registros de aceleración, notamos que el segundo pico se encuentra presente a la misma frecuencia y con una forma similar a los obtenidos a partir de registros de velocidad. Sin embargo, el primer pico, interpretado como el periodo fundamental del suelo, no se aprecia en el cociente obtenido a partir de datos de aceleración. En el Anexo II se describen algunas pruebas realizadas a un acelerómetro Episensor, hechas con la intención de determinar la razón por la cual no se pudo identificar el modo de vibración fundamental con estos sensores.

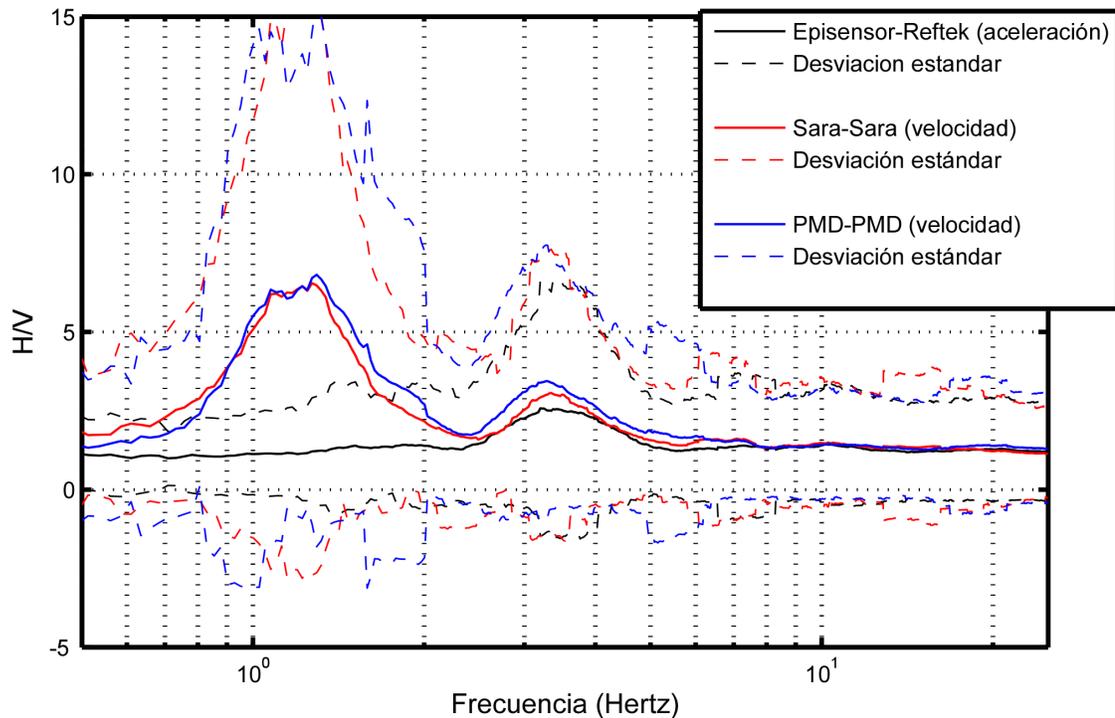


Figura 30. Cocientes espectrales H/V obtenidos a partir de registros de ruido ambiental en aceleración y velocidad. Esta figura muestra que en la vecindad del edificio de La Salina las frecuencias de resonancia del primero y segundo modos de vibración del suelo son de 1.2 Hz y 3.2 Hz respectivamente.

Como resumen de los resultados de este Capítulo, la frecuencia fundamental de vibración en el edificio de Tijuana fue determinada en 5 Hz, mientras que la del suelo fue de 0.6 Hz. Por otro lado la frecuencia fundamental de vibración en el sentido longitudinal del edificio de Puerto Salina fue de 2.1 Hz. En esta componente también se identificó un segundo modo a 7.2 Hz. En el sentido transversal de este edificio, el primer modo se encontró a 1.9 Hz, y el segundo a 6 Hz. También se observó un modo de vibración en la componente transversal a 2.8 Hz, probablemente debida a la torsión del edificio. La frecuencia fundamental de vibración en campo libre cercano al edificio de Puerto Salina fue de 1.1 Hz y el segundo modo se presenta a 3.2 Hz. (Tabla 3).

Tabla 3. Frecuencias de los modos de vibración del edificio y del suelo en Puerto Salina obtenidos en este capítulo.

Tijuana		Modo fundamental (Hz)	
Edificio		5	
Suelo		0.6	
Puerto Salina		Modo fundamental (Hz)	Segundo modo (Hz)
Edificio longitudinal		2.1	7.2
Edificio transversal		1.9	6
Edificio Rotacional		2.8	8.1
Suelo		1.1	3.2

Las frecuencias de vibración, determinadas en este capítulo, servirán de base para realizar un análisis de peligro sísmico, en el cual el parámetro analizado es la aceleración espectral, a las frecuencias de vibración de los edificios estudiados. Lo anterior para elegir un sismo de diseño. En el siguiente capítulo se aborda el tema de peligro sísmico, tanto para el norte de Baja California como para los sitios en estudio.

Capítulo 3. Peligro sísmico

3.1. Análisis de peligro sísmico

En esta parte de la tesis se aborda el aspecto del peligro sísmico en los sitios donde se ubican los edificios bajo estudio. Aquí, los objetivos de la tesis son, por consiguiente:

- a) identificar las fuentes sísmicas con mayor potencial dañino en los sitios donde se ubican los edificios;
- b) elaborar un análisis de peligro sísmico probabilista considerando todas las posibles fuentes regionales identificadas;
- c) estimar un espectro de peligro uniforme asociado a un periodo de retorno específico;
- d) hacer la desagregación del peligro sísmico probabilista para identificar la magnitud y la distancia entre los sitios de interés y las fuentes que contribuyan mayormente al peligro en ellos;
- e) seleccionar de bases de datos disponibles, un registro de aceleración con la magnitud y la distancia identificados, cuyo espectro de respuesta sea lo más parecido posible al espectro de peligro uniforme calculado; y
- f) analizar la respuesta dinámica de la estructura (Capítulo 4) con las aceleraciones de los movimientos del suelo del registro elegido.

El peligro sísmico se define como la probabilidad de que en un sitio se produzcan movimientos sísmicos con intensidades por arriba de un cierto umbral y en un determinado periodo de tiempo. Las consecuencias negativas derivadas de estos probables movimientos se consideran como parte del riesgo para la sociedad. La vulnerabilidad de la sociedad, por lo tanto, se refiere a lo susceptible que ésta resulta a tales efectos dañinos; éste parámetro es inverso a la capacidad que tiene la sociedad de resistir tales efectos adversos.

El peligro sísmico no debe confundirse con el riesgo sísmico. Este último se determina convolucionando el peligro sísmico con la vulnerabilidad en un intervalo de tiempo específico. En consecuencia, para evaluar el riesgo sísmico en una región resulta indispensable hacer primeramente una estimación del peligro sísmico.

Para unificar criterios, la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO por sus siglas en inglés), en conjunto con la Organización de las Naciones Unidas para Ayuda ante Desastres (UNDRO por sus siglas en inglés), propusieron la siguiente definición de peligro sísmico:

$$H = P[Y(x) \geq y^*; t]. \quad (11)$$

El peligro (H) queda definido, entonces, como la probabilidad de que el parámetro característico del movimiento del suelo (Y , que puede ser, aceleración pico, velocidad pico, aceleración espectral, entre otros) en la ubicación (x), se iguale o exceda algún valor (y^*) de un parámetro del movimiento del suelo en un periodo de tiempo dado (t ; en años) (Morales et al., 2012). Entonces, un análisis de peligro sísmico incluye la evaluación cuantitativa de los niveles esperados de algún parámetro de movimiento del suelo. Existen distintos tipos de análisis de peligro sísmico, tales como el análisis determinístico y el análisis probabilístico, los cuales se describen brevemente a continuación.

3.1.1. Análisis determinístico de peligro sísmico

Los métodos determinísticos fueron los primeros en ser utilizados en análisis de peligro sísmico. En ellos se plantea un escenario sísmico en particular, en el cual se basa la evaluación del peligro sísmico en una región o en una localización específica. El escenario sísmico consiste en postular uno o varios sismos fuertes con posibilidades de ocurrir en la región considerada. Los pasos para su postulación se describen de manera breve a continuación.

- Definición de la localización donde se evaluará el peligro sísmico, e identificación de la geometría de las fuentes generadoras de los sismos que puedan causar daños.

- Definición del parámetro de distancia que será usado, esto es, de la localización donde se evaluará el peligro a la fuente. Generalmente en los análisis determinísticos se utiliza la distancia más corta a la falla del sismo postulado.
- Determinación de la máxima magnitud esperada de un sismo, en cada una de las posibles fuentes generadoras de peligro. Esto se establece con base en sismos que han ocurrido en el pasado y considerando las características sísmicas y tectónicas de cada una de las zonas sísmicas consideradas.
- Definición y cálculo del parámetro del movimiento sísmico por analizar (aceleración, velocidad o amplitud espectral, entre otros) para cada una de las fuentes sísmicas consideradas. Lo anterior se realiza mediante el uso de curvas de atenuación de movimientos fuertes que están expresadas en función de la distancia, la magnitud de los sismos y las condiciones geológicas en el sitio, entre otros parámetros.
- Determinación del peligro en el sitio de evaluación, tomando como sismo de control o sismo de diseño a aquel que produzca el máximo valor del parámetro de movimiento considerado.

Este método se utiliza en el diseño de plantas nucleares, presas o estructuras para las cuales un evento sísmico importante podría provocar consecuencias catastróficas. Su uso se debe a que plantea la situación más desfavorable posible en el sitio de manera rápida y sencilla. El método determinista tiene algunas desventajas. No proporciona información de la probabilidad de la ocurrencia del sismo de control (el sismo de cierta magnitud y a cierta distancia que produce el peor escenario posible), ya que no toma en cuenta la ley de recurrencia sísmica. Además, no toma en cuenta al resto de los sismos, aquellos con magnitudes menores a la máxima esperada y que ocurran en sitios distintos a la distancia más corta. Tampoco provee la probabilidad de que el sismo ocurra en el lugar establecido, ni la probabilidad de que cierto valor del parámetro sea excedido. El método involucra decisiones subjetivas, sobre todo en la determinación del

potencial sísmico, al suponer la magnitud máxima posible en las fuentes sísmicas generadoras de peligro.

3.1.2. Análisis probabilístico de peligro sísmico

El método probabilístico fue propuesto por Cornell (1968). A diferencia del método determinista, este método considera las contribuciones al peligro de todos los sismos con magnitudes por encima de una magnitud mínima. Adicionalmente, los sismos producidos por todas las posibles fuentes generadoras de peligro se distribuyen en la región bajo estudio de acuerdo a una ley de recurrencia sísmica. Como resultado, el método probabilista combina las incertidumbres existentes en cuanto a la ubicación de los sismos, a sus magnitudes y a los movimientos predichos del suelo para obtener una estimación de la probabilidad de excedencia de cierto valor de un parámetro de movimiento del suelo en un tiempo determinado y en una localización específica.

Estos tipos de análisis son importantes en la determinación de las consecuencias adversas que puede sufrir la sociedad debido a sismos futuros y, por tanto, en la toma de decisiones por parte de las autoridades. En áreas despobladas, los análisis de este tipo son importantes solamente si existe infraestructura de importancia para la sociedad, tales como plantas nucleares, presas, centrales hidroeléctricas, etcétera.

El análisis de probabilidades ha sido ampliamente usado por ingenieros y planificadores con el propósito de minimizar las pérdidas por sismo. Los niveles de diseño sísmico para estructuras ya existentes, la planeación para emergencias de la sociedad y el establecimiento de prioridades para mitigar el riesgo sísmico han sido colocados en un marco probabilista.

A continuación se presentan los pasos a seguir en el método de Cornell (1968).

- **Caracterización de las Fuentes Sísmicas:** identificación de la geometría de las fuentes generadoras de sismos que puedan causar daños y definición de la ubicación donde se evaluará el peligro sísmico. En este paso se calcula también

la distribución de probabilidades de distancia considerando la geometría de cada una de las fuentes.

- **Caracterización de la sismicidad:** para caracterizar cada zona sismogénica se utiliza una relación que especifique el número de veces que la magnitud de un sismo será excedida en un cierto periodo de tiempo. Generalmente se utiliza la relación de Gutenberg y Richter (1956), cuyos parámetros a y b son característicos de cada zona particular. Antes de utilizarse, esta relación se trunca con un límite inferior y un límite superior de la magnitud de los sismos.
- **Ecuaciones predictivas de movimientos del suelo:** mediante el uso de estas ecuaciones se calculan los valores esperados del parámetro de interés en función de la magnitud y la distancia a cada punto de la zona de fuentes.
- **Ecuación de Peligro Sísmico.** En esta ecuación se combinan: la probabilidad de que un sismo ocurra a cierta distancia del sitio a la fuente, la probabilidad de que el sismo tenga cierta magnitud y la probabilidad de que para cada combinación de magnitud-distancia se exceda cierto valor del parámetro de movimiento del suelo. Al sumar las probabilidades de excedencia de todas las posibles fuentes que afecten el sitio se obtiene el peligro total.

Los resultados de un análisis probabilístico pueden presentarse de distintas maneras. Por ejemplo:

- **Curvas de peligro sísmico.** Las curvas de peligro sísmico son gráficas que representan la razón o tasa anual de excedencia de distintos valores del parámetro de interés en un tiempo determinado. La Figura 31, por ejemplo, es el resultado de un ejemplo descrito en el Capítulo 4 del libro publicado por Kramer (1996). La figura indica el número de veces que el parámetro de interés (aceleración horizontal) entre 0 y 1 g ($g = 980 \text{ cm/s}^2$) será excedido anualmente debido a movimientos producidos por una fuente lineal, una fuente rectangular, una fuente puntual o por todas las fuentes.

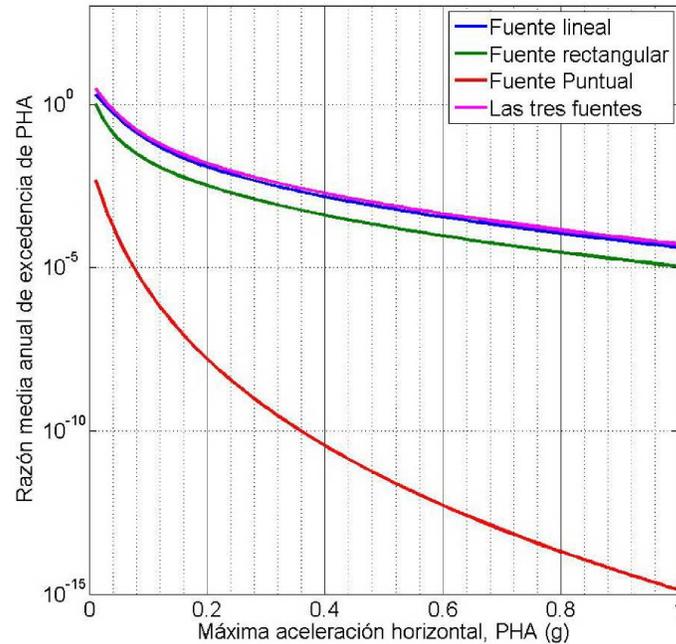


Figura 31. Curvas de peligro sísmico de un ejemplo descrito en el libro de Kramer (1996).

- **Desagregado de peligro sísmico.** El desagregado del peligro sísmico es un proceso realizado para determinar, en un punto en particular, cual es la contribución de cada una de las fuentes al peligro sísmico total. Esta información puede ser presentada como mapas en 3D y coordenadas geográficas (Figura 32), en los que se muestra la distribución de las contribuciones de todas las fuentes al peligro total.
- **Espectros de respuesta de peligro sísmico uniforme.** Estas son curvas en las que los valores de la aceleración espectral a cualquier periodo que se considere tienen la misma probabilidad de ser excedidos (Figura 33).

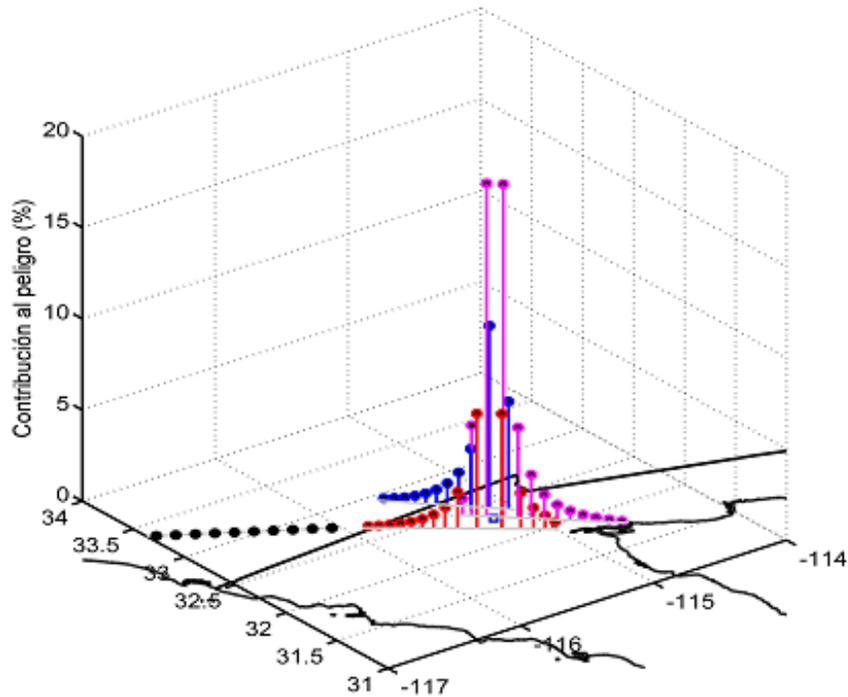


Figura 32. Mapa del desagregado del peligro sísmico que las cuatro fuentes lineales consideradas plantean en el sitio marcado con el cuadro azul. Cada barra en este mapa representa la suma de las contribuciones de todos los sismos de diferentes magnitudes con probabilidad de ocurrir en cada una de las distancias fuente-sitio.

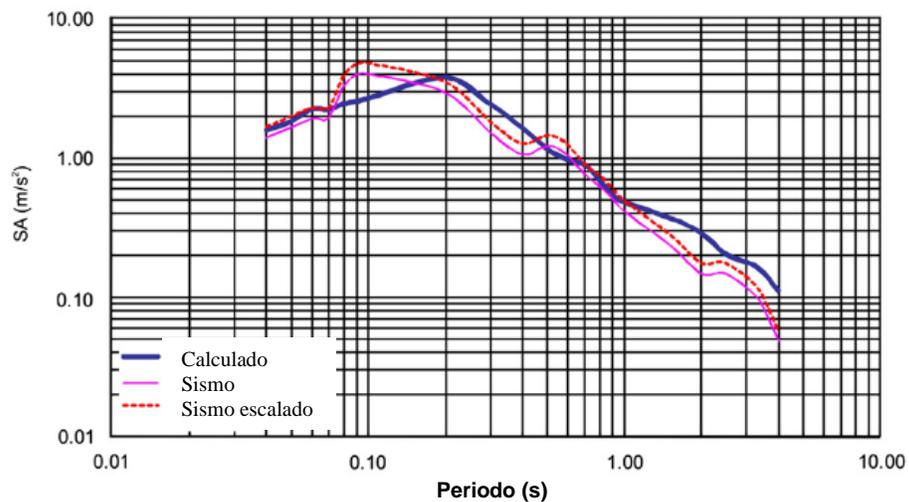


Figura 33. En esta gráfica se muestra con línea azul, el espectro de peligro uniforme calculado para San Pedro Cliff (norte de Italia), con probabilidad de excedencia 5%, amortiguamiento relativo 5% y tiempo de exposición 50 años. Con línea rosa se muestra el espectro de respuesta del sismo de Friuli, el cual ocurrió el 15 de Septiembre de 1976, con magnitud M_w 6.0. La línea roja es el espectro de respuesta del sismo de Friuli, el cual fue escalado para obtener una mejor aproximación al espectro de peligro uniforme (Figura modificada de Morales et al., 2012).

- **Mapas de peligro sísmico.** Estos mapas muestran, para cada sitio, el valor del parámetro de interés con una cierta probabilidad de ser excedido en un cierto periodo de tiempo (Figura 34).

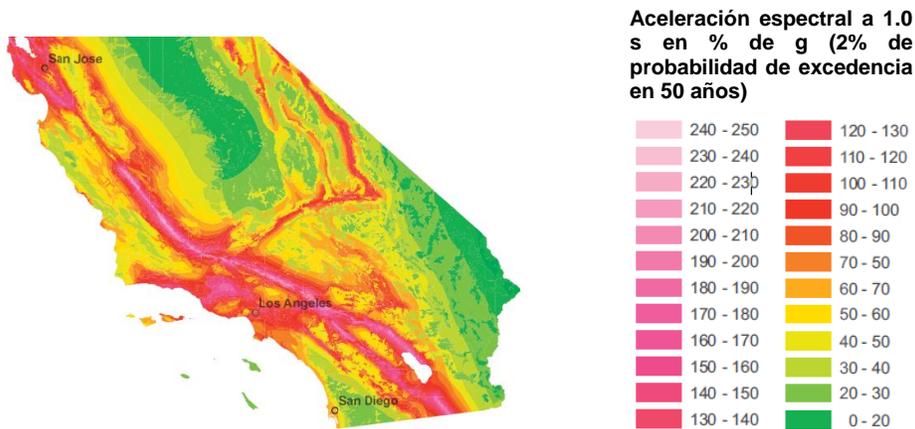


Figura 34. Mapa de peligro sísmico de la región sur del sur de California, Estados Unidos. Se muestra la aceleración espectral en por ciento de g a 1.0 s, con 2 % de probabilidad de excedencia en 50 años (Modificado de Kalkan *et al.*, 2010).

3.2. Método de Cornell

En esta sección se describen más detalladamente los pasos definidos por Cornell (1968) para el cálculo de peligro sísmico.

3.2.1. Caracterización de las Fuentes Sísmicas

Caso de fuentes lineales. La caracterización de fuente lineal de eventos sísmicos consiste en definir la geometría de la falla y calcular la distribución de probabilidad de las distancias que hay entre los sismos que ocurren en esta falla y el sitio donde se está evaluando el peligro [Probabilidad de que $R = r$]. En el caso de fuentes lineales, se utilizan dos procedimientos, uno utilizado en la generación de mapas de peligro sísmico y el otro utilizado en mapas de desagregado del peligro sísmico para una ubicación en particular.

- i. La longitud de la línea de fuentes identificada (la traza superficial de una falla) se discretiza en un número grande de pequeñas celdas igualmente espaciadas. Se supondrá que en los puntos centrales de estas celdas, ubicados a diferentes distancias del sitio de observación, podrá ocurrir un cierto número de sismos con magnitudes en un intervalo limitado por una magnitud mínima y una magnitud máxima. Como ejemplo, en la Figura 35 se muestra una fuente lineal de 120 km dividida en 120 celdas ($n=120$) con separación de 1 km entre sus puntos centrales.
- ii. A continuación se calculan las distancias que hay entre el sitio de interés y cada uno de los puntos centrales de las celdas sobre la falla, es decir, a las 120 ubicaciones de posibles fuentes sísmicas sobre la falla. En toda situación, siempre habrá una distancia máxima y una distancia mínima de las fuentes más alejada y más cercana al sitio donde se evalúa el peligro sísmico. Si la diferencia que hay entre la distancia máxima y la distancia mínima se divide en un número arbitrario, se obtiene como resultado un número de intervalos de distancia de igual longitud.
- iii. En virtud a que no habrá distancias mayores que la distancia máxima o menores que la distancia mínima, entonces cualquier otra distancia fuente-sitio estará incluida en alguno de los intervalos de distancia generados. Dependiendo de la ubicación relativa del sitio en evaluación y la línea de fuentes, los intervalos de distancia incluirán cantidades diferentes de distancias fuente-sitio. Contando el número de distancias que caen en cada intervalo y normalizando al número total de puntos sobre la falla, se obtiene la probabilidad de que los sismos ocurran en los diferentes intervalos de distancia. La probabilidad de ocurrencia de distancia calculada de esta manera se asigna a la distancia media de cada intervalo.
En el ejemplo de la Figura 35, a la distancia máxima (90 km) se le restó la distancia mínima (20 km), y el resultado se dividió arbitrariamente entre siete ($N_R = 7$), dando como resultado siete intervalos de 10 km de longitud cada uno. El primero de estos intervalos de distancia va de 20 a 30 km, con distancia media de 25 km, el segundo intervalo va de 30 a 40 km, con centro en 35 km y así sucesivamente. Con esto, la distancia entre el sitio en estudio y cualquier punto sobre la línea de fuentes tendrá que estar incluida en alguno de los intervalos así

definidos. En este punto, es importante señalar que mientras mayor sea N_R mayor será también la precisión en los cálculos que se realicen. El diagrama de barras de la Figura 36 muestra tanto la contabilización de distancias por intervalo como la correspondiente probabilidad de que los sismos ocurran a la distancia media del intervalo, $R= r$.

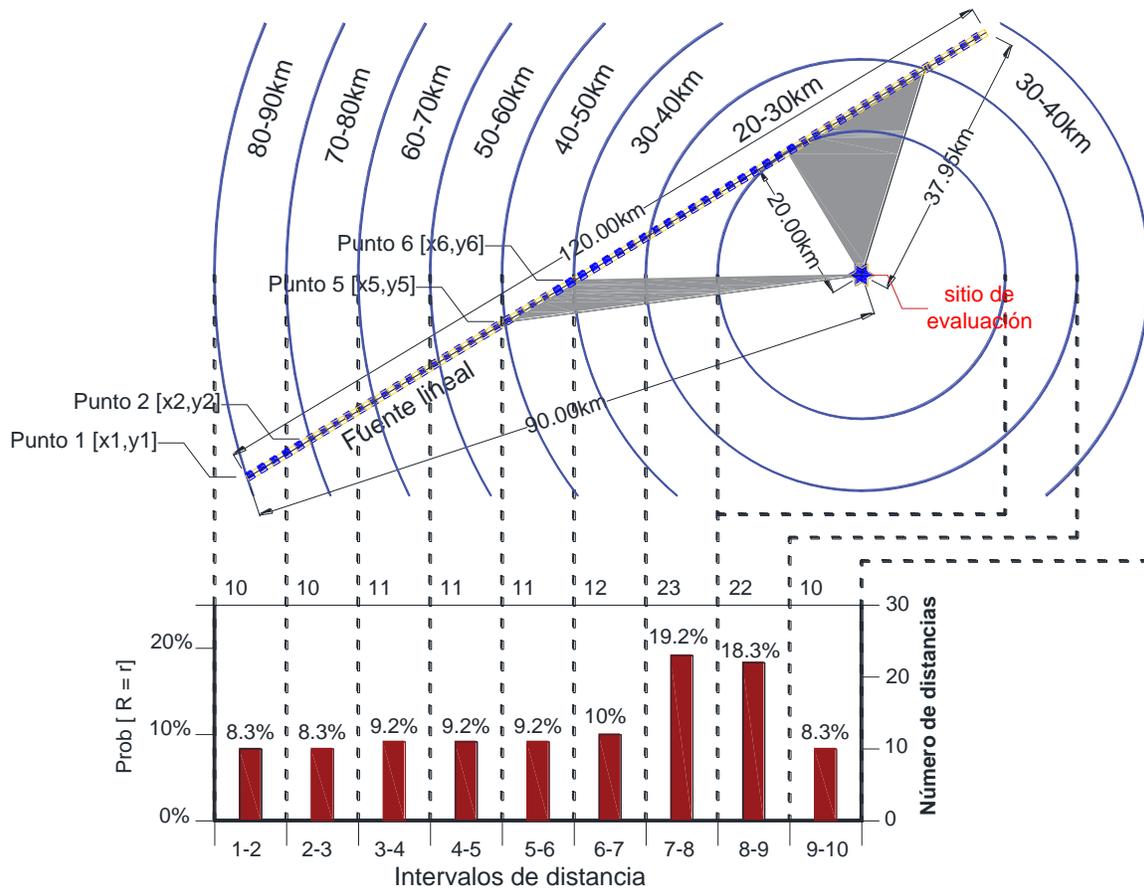


Figura 35. Diagrama de la determinación de la distribución de probabilidad de distancia para una fuente lineal.

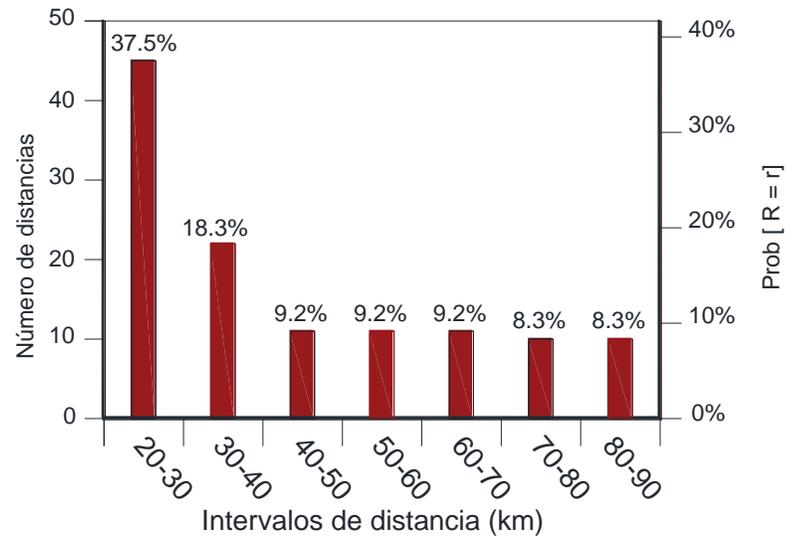


Figura 36. Distribución de probabilidades de que $R=r$, del ejemplo de la Figura 35.

En los mapas de peligro sísmico cada punto muestra el valor del parámetro de interés con cierta probabilidad de ser excedida, en un determinado número de años (el cálculo de esta probabilidad se explica más adelante en este capítulo). Por lo tanto, no muestran la posición de los sismos que contribuyen en mayor medida al peligro, sino que muestran simplemente el valor resultante de la suma de todas las probabilidades de excedencia. Por tal motivo, y para este caso en particular, no es de interés mantener el control de las coordenadas de cada punto e intervalos de distancias.

En el proceso del cálculo de desagregado de peligro también se divide la longitud de la falla o línea de fuentes en n celdas de igual longitud. Los intervalos de distancias entre las fuentes y el sitio en estudio se determinan de la misma manera que en el caso anterior. Sin embargo, en esta ocasión se tiene la precaución de tener siempre el control de las coordenadas de la ubicación de las fuentes. Esto es con el propósito de tener no solo el control de los correspondientes intervalos de distancia sino también el control de la posición geográfica de las fuentes. En el ejemplo de la Figura 35 se muestra el conteo de distancias a las fuentes para cada intervalo de distancia. Ahora se consideran separadamente las posiciones de las fuentes que están a la izquierda de la fuente que corresponde a la distancia más corta y a la derecha de ésta. La ventaja de tal procedimiento es que en los resultados a obtener se verá claramente cuál es la posición del evento o eventos que contribuyen en mayor medida al peligro sísmico. Este

caso es importante en la generación de gráficas 3D, en las que se muestran los resultados del desagregado del peligro sísmico. Estas gráficas 3D muestran la contribución al peligro sísmico de las fuentes con distancias repartidas en los diferentes intervalos de distancia.

Caso de fuentes complejas. Por fuente compleja se entenderá aquí una zona de sismicidad que puede ser de forma rectangular, poligonal, circular, etcétera. Para calcular la distribución de probabilidades respecto a la ubicación de una fuente más compleja, el procedimiento es similar al de una fuente lineal, como se describe a continuación:

- i) Primero se define su geometría y el área correspondiente se divide en un número de $n \times n$ celdas.
- ii) Después se calculan las distancias más corta y más larga entre el sitio y las fuentes más cercana y más lejana, respectivamente. Lo que resulta de restar la distancia más corta de la más larga se divide en un número N_R de intervalos.
- iii) Como antes, se calculan las distancias del sitio de observación a cada una de las celdas que constituyen la fuente compleja de eventos sísmicos y se contabilizan las distancias de acuerdo a los N_R intervalos de distancia definidos en el paso anterior.

En la Figura 37 se muestra una fuente compleja dividida en 1701 celdas con áreas de un kilómetro cuadrado cada una. Si se resta la distancia mínima (20 km) a la distancia máxima (80 km) y se divide el resultado entre seis, resultan seis intervalos con incremento de 10 km cada uno para este ejemplo. Sin embargo, para lograr cálculos más precisos, se deberá usar un número mayor de intervalos de distancia (con un N_R más grande). Análogamente al caso anterior, se calcula la distancia desde el punto de interés a cada una de las celdas y, de acuerdo a su valor, se contabiliza en el intervalo de distancias al que corresponda. Aquí también se hace la suposición de que en cada una de las celdas existe la misma probabilidad de que haya uno o más sismos.

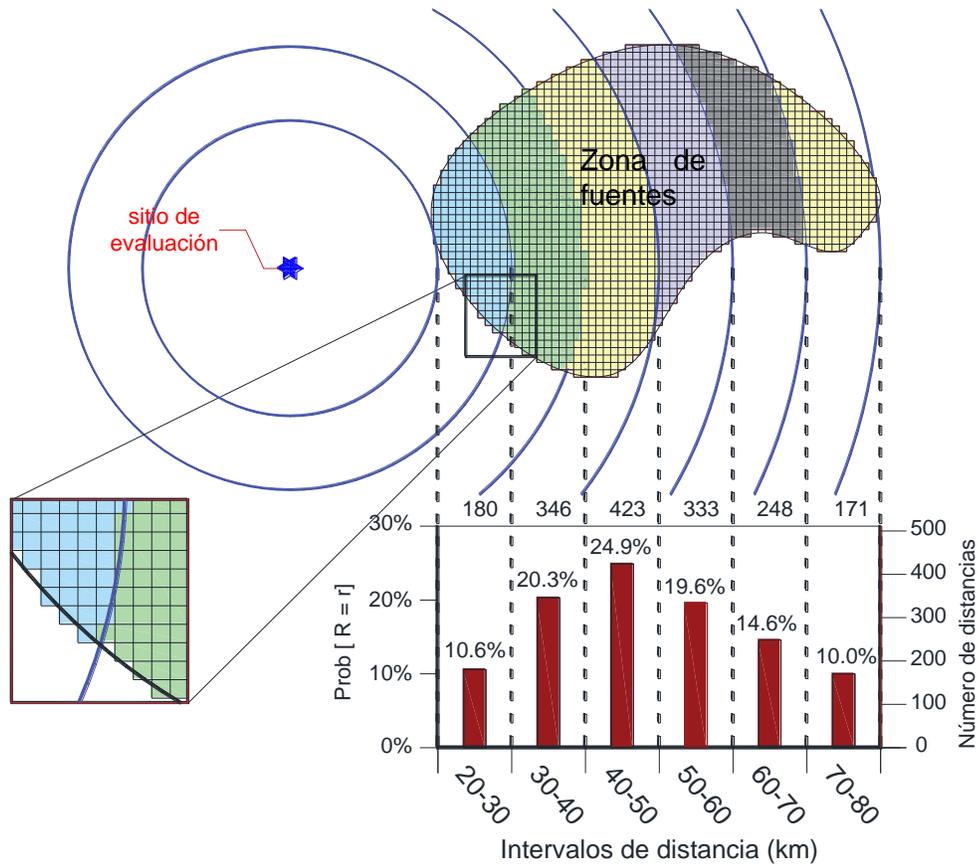


Figura 37. Ejemplo de la caracterización de una fuente compleja.

3.2.2. Caracterización de la sismicidad

La ecuación más utilizada para describir la ocurrencia de sismos en una región es la de Gutenberg y Richter (1944). En su forma estándar, esta ley se expresa como:

$$\log_{10} \lambda_m = a - bm, \quad (12)$$

donde:

λ_m : Razón o tasa anual media de excedencia de la magnitud m .

10^a : Número de sismos con magnitudes por arriba de cero.

b : Describe la probabilidad relativa de ocurrencia de sismos con diferentes magnitudes.

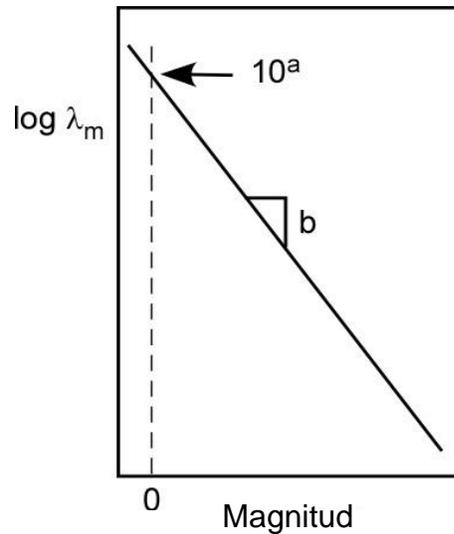


Figura 38. Diagrama de la línea recta de la ecuación de Gutenberg-Richter.

Despejando la razón anual media de excedencia λ_m :

$$\lambda_m = 10^{(a-bm)}. \quad (13)$$

A continuación se obtiene el logaritmo natural de la relación anterior:

$$\ln \lambda_m = (a - bm) \ln(10) = 2.303(a - bm). \quad (14)$$

Con $\alpha = 2.303 a$ y $\beta = 2.303 b$, y al obtener el antilogaritmo de la ecuación 14 obtenemos:

$$\lambda_m = e^{(\alpha - \beta m)}. \quad (15)$$

En esta última forma de la ecuación de Gutenberg y Richter la razón media anual de excedencia de sismos con magnitud m tienen una distribución exponencial.

Para propósitos de cálculos de peligro sísmico la línea recta de la ecuación de Gutenberg y Richter se acota por una magnitud mínima y una magnitud máxima. Se considera como magnitud mínima a la mínima magnitud que se supone puede llegar a generar daños a la población. Generalmente esta magnitud mínima, denotada como

m_0 , es 4.5 en estudios de peligro sísmico. La magnitud máxima depende de la zona de fuentes y se considera la máxima esperada en ésta.

Al sustituir la magnitud mínima considerada, m_0 , en la ecuación 15 tenemos:

$$\lambda_{m_0} = e^{(\alpha - \beta m_0)} = \nu, \quad (16)$$

donde λ_{m_0} es la tasa anual de excedencia de la magnitud mínima considerada y en adelante será nombrada ν . En la Figura 39 se ve que λ_{m_0} es igual al máximo número de sismos con magnitudes mayores a m_0 .

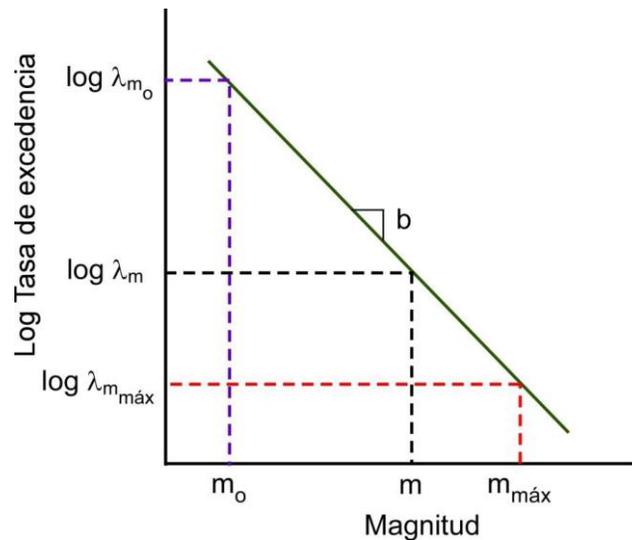


Figura 39. Línea recta de la ecuación de Gutenberg-Richter, la cual está acotada por una magnitud mínima (m_0) y una magnitud máxima (m_{max}).

En base a lo anterior, la probabilidad de que la magnitud M sea menor que la magnitud m en un intervalo entre m_0 y m_{max} :

$$F_M(m) = P[m > M \mid m_0 \leq M \leq m_{max}] = \frac{(\lambda_{(m_0)} - \lambda_m)}{(\lambda_{(m_0)} - \lambda_{(m_{max})})} = \frac{(e^{(\alpha - \beta m_0)}) - (e^{(\alpha - \beta m)})}{(e^{(\alpha - \beta m_0)}) - (e^{(\alpha - \beta m_{max})})}. \quad (17)$$

Eliminando el factor común e^α y dividiendo el numerador y el denominador por $e^{\beta m_0}$ tenemos:

$$F_M(m) = P[M < m | m_0 \leq M \leq m_{\max}] = \frac{1 - e^{-\beta(m-m_0)}}{1 - e^{-\beta(m_{\max}-m_0)}}. \quad (18)$$

Que es la expresión habitual de la función de distribución de probabilidad acumulada (CDF, por sus siglas en inglés).

Por lo tanto la función de densidad de probabilidad (PDF) puede ser obtenida mediante la derivada de la ecuación (18):

$$f_m(m) = \frac{(d(F_M(m)))}{dm} = \frac{\beta e^{-\beta(m-m_0)}}{1 - e^{-\beta(m_{\max}-m_0)}}. \quad (19)$$

Para obtener la distribución de probabilidad de que $m = M$ en el caso discreto, primero se definen las magnitudes máxima y mínima en cada zona de fuentes. Al dividir la diferencia de estas magnitudes entre un número arbitrario, N_M , se obtiene el incremento para formar intervalos de magnitud. Como ejemplo, si consideramos una zona de fuentes con magnitudes máxima y mínima de 7.2 y 4.5, respectivamente, entonces para $N_M = 10$ el incremento en la magnitud será

$$\Delta M = \frac{m_{\max} - m_{\min}}{N} = \frac{7.2 - 4.5}{10} = 0.27. \quad (20)$$

Con esto resultan 10 intervalos de magnitud con longitud $\Delta M = 0.27$, de tal modo que el primer intervalo va de 4.5 a 4.77 con punto medio en 4.635, el segundo de 4.77 a 5.04 centrado en 4.905 y así el resto. Análogamente a como se hizo con las distancias, ya definidos los intervalos de magnitud, se realiza un conteo de los sismos con magnitudes que caen en cada uno de esos intervalos.

3.2.3. Ecuaciones predictivas de movimientos del suelo

Para cualquier estudio de peligro sísmico es necesario obtener una estimación de los movimientos del suelo debidos a un sismo. Esto se logra mediante el uso de ecuaciones predictivas o modelos de atenuación de los movimientos fuertes disponibles. Para una distancia r y una magnitud m , estas ecuaciones predicen un valor medio del parámetro de interés y su respectiva desviación estándar (ejemplo: Boore y Ambraseys, 1993). Típicamente, los modelos de atenuación se obtienen a partir de regresiones empíricas utilizando bases de datos de movimientos fuertes (Joyner y Boore, 1981).

A manera de ejemplo, la Figura 40 muestra la gráfica de una ecuación predictiva para sismos de magnitud m . La figura muestra también que a la distancia r , el valor medio del parámetro en consideración y su desviación estándar permiten calcular la probabilidad de que ese valor sea excedido usando la función de probabilidad estandarizada.

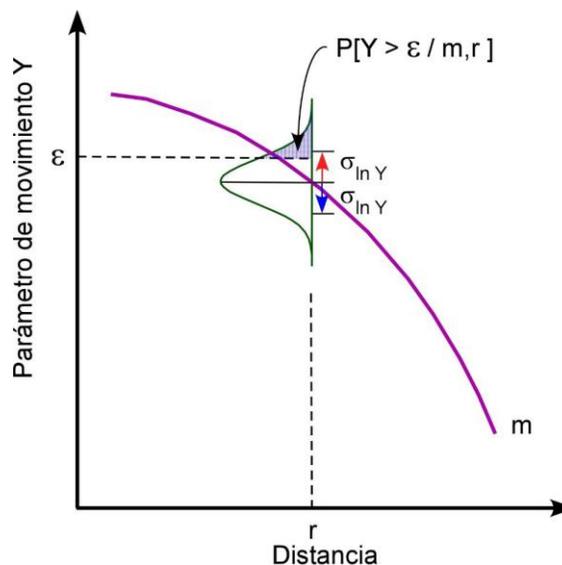


Figura 40. Diagrama de una curva predictiva de movimientos fuertes para sismos de magnitud m .

En este trabajo se utilizó la ecuación predictiva de Boore y Atkinson (2008) disponible para la región oeste de Estados Unidos. Esta ecuación, que es parte de la Nueva Generación de Modelos de Atenuación (NGA), se expresa como:

$$\ln Y = F_M(M) + F_D(R_{JB}, M) + F_S(V_{S30}, R_{JB}, M) + \varepsilon\sigma_T. \quad (21)$$

Donde F_M , F_D y F_S representan, funciones de magnitud, de distancia y de la amplificación del movimiento sísmico en el sitio, respectivamente. M es la magnitud de momento sísmico, R_{JB} es la distancia más cercana a la proyección de la falla en la superficie y V_{S30} es el promedio de la velocidad de ondas de corte en los primeros 30 m de la corteza. El parámetro ε es un número de desviaciones estándar que se añaden al valor medio del parámetro Y para llevar la intensidad del movimiento sísmico a niveles más altos o más bajos de su valor medio (percentil 84, por ejemplo). Este parámetro es, por tanto, una medida de la tolerancia admitida a la hora de usar la ley de atenuación. Mientras más alto sea ε , menor será la probabilidad de excedencia y viceversa (Abrahamson y Shedlock, 1997). El coeficiente σ_T es dependiente del periodo (Boore y Atkinson, 2008).

Esta ecuación permite calcular el valor medio del parámetro de interés y proporciona su respectiva desviación estándar. Utilizando el valor medio y la desviación estándar, podemos calcular la probabilidad de excedencia de cierto valor del parámetro seleccionado usando la función de probabilidad estandarizada.

3.2.4. Ecuación de Peligro Sísmico

Una vez obtenida una distribución de probabilidades respecto a la distancia a la fuente y la distribución de probabilidades respecto a la magnitud del sismo, se utiliza la ecuación predictiva de movimientos del suelo para calcular la probabilidad de excedencia de cada una de las combinaciones magnitud-distancia. En la Figura 41 se muestra un ejemplo de una matriz de combinaciones de intervalos de distancia (desde $k = 1$ hasta el número de intervalos N_R) con intervalos de magnitud (desde $j = 1$ hasta el

número de intervalos N_M), teniendo en total $N_R \times N_M$ combinaciones magnitud-distancia para una zona de fuentes y para un solo valor del parámetro de movimiento.

Intervalos de distancia fuente-sitio

M/D	k=1	k=2	k= N_R
j=1							
j=2							
j=3							
.							
.							
.							
.							
j= N_M							N_R, N_M

Figura 41. Ejemplo de una matriz de probabilidades de excedencia, para distintas combinaciones de magnitud y distancia. Donde k representa el número de intervalos de distancias y j el número de intervalos de magnitud.

Usando el teorema de probabilidad total tenemos que al sumar la probabilidad de excedencia de cada una de las combinaciones, obtenemos la probabilidad de que el parámetro de interés sea excedido en caso de un sismo generado por la i -ésima zona de fuentes. Por lo tanto la probabilidad de que el parámetro de movimiento del suelo Y exceda un valor específico y^* es:

$$P[Y > y^*] = \iint P[Y > y^* | m, r] f_M(m) f_R(r) dm dr. \quad (22)$$

Al multiplicar la probabilidad de excedencia del parámetro por la tasa media anual de excedencia de la magnitud mínima, ν , obtenemos la tasa media anual de excedencia del valor del parámetro de interés λ_{y^*} . La tasa o razón media anual de sismos ν se define con base en la sismicidad histórica de cada zona de fuentes. Sumando la contribución de todas las N_S zonas de fuentes consideradas obtenemos la tasa anual de excedencia total del parámetro de interés en un sitio (caso continuo):

$$\lambda_{y^*} = \sum_{i=1}^{N_s} (\nu_i \iint P[Y > y^* | m, r] f_{M_i}(m) f_{R_i}(r) dm dr), \quad (23)$$

o en el caso discreto:

$$\lambda_{y^*} = \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{j=1}^{N_M} \sum_{k=1}^{N_R} (\nu_i P[Y > y^* | m_j, r_k] P[M = m_j] P[R = r_k]). \quad (24)$$

Finalmente, aplicando la ecuación anterior a distintos valores del parámetro de interés, obtenemos una curva de razón o tasa media anual de excedencia para un sitio, como la mostrada en la Figura 31.

A partir de la curva de razón media anual se pasa a una curva de probabilidad mediante el uso de la distribución de Poisson. El modelo de Poisson describe la probabilidad de que cierto número de eventos se logren en un periodo de tiempo dado (Kramer, 1996).

Esta distribución de probabilidad se denota como:

$$P(N = n) = \frac{(\mu)^n e^{-\mu}}{n!}, \quad (25)$$

donde $P(N = n)$ representa la probabilidad de que la variable aleatoria N , presente n número de ocurrencias en un periodo de tiempo dado. En este caso μ es el número promedio de veces que ocurre un evento en un cierto tiempo.

Al suponer que la ocurrencia de sismos sigue un proceso estacionario que se ajusta al modelo de Poisson, es decir, que la sismicidad que ha ocurrido en el pasado será similar a la que ocurrirá en el futuro, y que cada evento es independiente del anterior definimos $N(T)$ como el número de eventos que tienen lugar en el intervalo de tiempo de exposición T (variable aleatoria). Entonces, la probabilidad de que ocurran k eventos en un tiempo T está dada por:

$$P(N(T) = k) = \frac{(\lambda)^k e^{-\lambda T}}{k!}. \quad (26)$$

Donde $\lambda(T)$ es la razón media anual de eventos que ocurren en un tiempo T .

A partir de la ecuación anterior, podemos calcular la probabilidad de que no ocurra ningún evento en un periodo de tiempo 0 a T con $k = 0$:

$$P(\text{ningún evento en un tiempo de } 0 \text{ a } T) = P(N(T) = 0) = \frac{(\lambda T)^0 e^{-\lambda T}}{0!} = e^{-\lambda T}. \quad (27)$$

Entonces la probabilidad de que haya al menos un evento en un periodo de tiempo de 0 a T es:

$$P(\text{al menos 1 evento en un tiempo de } 0 \text{ a } T) = 1 - e^{-\lambda T}. \quad (28)$$

Por tanto, tenemos que la ecuación (11) queda expresada de la siguiente forma:

$$H(y^*; T) = P(Y(x) \geq y^*; T) = 1 - e^{-\frac{\lambda}{y^*} T}. \quad (29)$$

Donde $\lambda(T)_{y^*} = \frac{1}{T_R}$ y T_R es el periodo medio de retorno, tiempo en el cual se repetirá un evento.

Recordemos que el peligro sísmico está representado por la función de peligro (H), de acuerdo a la ecuación (11):

$$H(y^*; T) = P[Y(x) \geq y^*; T].$$

donde $P[Y(x) \geq y^*; T]$ es la probabilidad de que el parámetro característico de movimiento del suelo, exceda el umbral y^* , al menos una vez durante un tiempo T . $Y(x)$ representa el parámetro del movimiento del suelo en una ubicación x .

Con la ecuación (29) pasamos de una curva de razón media anual de excedencia a una curva de probabilidad de excedencia. Esta ecuación la escribimos de la siguiente manera:

$$\{1 - P(Y(x) \geq y^*; T)\} = e^{-\lambda_{y^*} T}. \quad (30)$$

Finalmente, obtenemos el logaritmo natural de la ecuación anterior y despejamos $\lambda(T)_{y^*}$, que es la razón media anual de veces que el parámetro Y , ha excedido el umbral y^* en la ubicación x .

$$\lambda_{y^*} = -\frac{\ln(1 - P(Y(x) \geq y^*; T))}{T}. \quad (31)$$

Como el periodo de retorno T_R es igual al inverso de λ_{y^*} , entonces:

$$T_R = -\frac{T}{\ln(1 - P(Y(x) \geq y^*; T))}, \quad (31)$$

el cual corresponde a una probabilidad P de que el parámetro Y se excedió al menos una vez en un tiempo de exposición T . La Figura 42 muestra la relación que existe entre el periodo de retorno y el tiempo de exposición para distintas probabilidades.

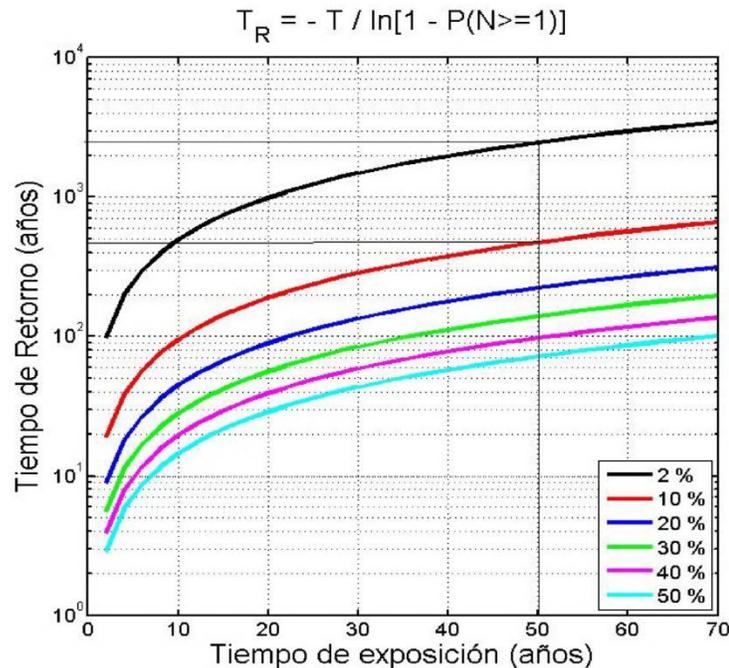


Figura 42. Relación entre el periodo de retorno y el tiempo de exposición, para distintas probabilidades de excedencia.

3.3. Desarrollo

El procesamiento de los datos se llevó a cabo con el programa EPPS14, diseñado por Luis Munguía (2014) y modificado por el autor de este trabajo. Este programa tiene 4 opciones de procesado, las cuales son: 1) generación de mapas de peligro sísmico, 2) obtención del desagregado de peligro sísmico, considerando fuentes lineales, 3) considerando fuentes complejas en sitios de interés y 4) cálculo del espectro de peligro uniforme en sitios específicos. En este trabajo, como una primera aproximación, solo se consideraron fuentes lineales.

Se utilizaron 50 fuentes lineales que representan fallas o segmentos de fallas en la región con base en la segmentación propuesta por Anderson *et al.* (1989) y a la propuesta por Munguía (2014). Éstas corresponden a fallas activas que tienen el potencial de generar sismos con magnitudes importantes, que pudieran generar alguna afectación en estructuras civiles. En la **Figura 43** se muestran los segmentos de fallas en color rojo superpuestos sobre los trazos de fallas regionales. Cada una de las

fuentes lineales tiene un número de referencia y algunos de sus parámetros se encuentran en la **Tabla 4**.

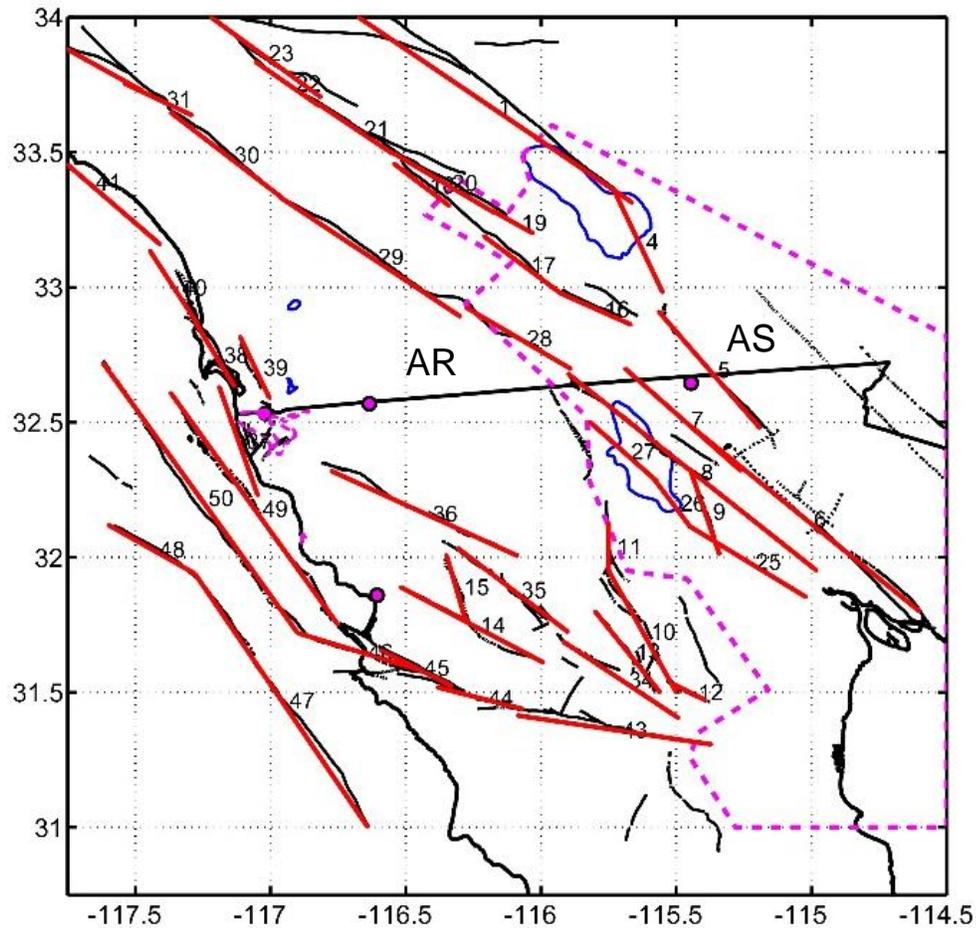


Figura 43. Fuentes lineales consideradas en el análisis de peligro sísmico. El polígono marcado con línea discontinua delimita las regiones de ambiente rocoso (AR) y sedimentario (AS).

La distribución de probabilidad de distancia, se calculó con el programa EPPS14, de acuerdo a lo descrito en la sección 3.2.1. Para todas las fuentes se utilizaron 10 intervalos de distancia, desde la distancia más corta a la distancia más larga del sitio a las fuentes. En la Figura 44 se muestran algunos histogramas calculados por el programa, tomando como punto de interés el sitio en donde se ubica el edificio de Puerto Salina.

Tabla 4. Fallas o segmentos de fallas utilizados en el análisis de peligro sísmico y algunas de sus características.

No	Segmento	Coordenadas de los extremos				a	b	M _{max}	Longitud Falla (km)	Acimut
		Longitud (°)	Latitud (°)	Longitud (°)	Latitud (°)					
1	San Andres (Indio)	-116.71	34.03	-115.66	33.31	4.52	0.92	7.3	126	129
2	San Andres (Palmdale)	-117.97	34.49	-116.71	34.03	4.52	0.92	7.5	127	114
3	San Andres (1857)	-117.97	34.49	-117.42	34.29	4.52	0.92	8	55	114
4	Brawley	-115.73	33.36	-115.55	32.98	4.18	0.9	6.4	45	158
5	Imperial (1940)	-115.57	32.91	-115.19	32.48	4.18	0.9	6.8	60	144
6	Cerro Prieto (1)	-115.44	32.48	-114.6	31.8	4.18	0.9	7.2	110	134
7	Cerro Prieto (2)	-115.69	32.7	-115.26	32.32	4.18	0.9	7	58	136
8	Cucapah Indiviso	-115.9	32.68	-114.98	31.95	4.08	0.91	7.2	119	133
9	El Mayor	-115.45	32.33	-115.34	32.01	4.08	0.91	6.5	37	164
10	Sierra Juárez (1)	-115.75	31.95	-115.5	31.5	4	0.98	5.8	55	155
11	Sierra Juárez (2)	-115.75	32.13	-115.75	31.95	4	0.98	5.8	20	180
12	Sierra Juárez (3)	-115.51	31.53	-115.39	31.47	4	0.98	5.8	13	120
13	Sierra Juárez (4)	-115.8	31.8	-115.56	31.5	4	0.98	5.8	40	146
14	Tres Hermanos (1)	-116.52	31.89	-115.99	31.61	4.45	0.93	5.8	59	122
15	Tres Hermanos (2)	-116.35	32.01	-116.28	31.77	4.45	0.93	5.8	27	166
16	San Jacinto (6xSupers.H.)	-115.92	32.98	-115.67	32.86	4.11	0.89	6.4	27	118
17	San Jacinto (1968)	-116.21	33.19	-115.92	32.98	4.11	0.89	6.5	36	131
18	San Jacinto (Coyote Mtn.)	-116.55	33.46	-116.34	33.3	4.11	0.89	6.3	26	132
19	San Jacinto (1954)	-116.18	33.28	-116.03	33.2	4.11	0.89	6.1	16	124
20	San Jacinto (Clark Valley)	-116.54	33.5	-116.17	33.28	4.11	0.89	6.7	42	125
21	San Jacinto (Anza)	-116.82	33.68	-116.55	33.49	4.11	0.89	6.6	33	129
22	San Jacinto (1899)	-117.06	33.84	-116.82	33.67	4.11	0.89	6.5	29	130
23	San Jacinto (1918)	-117.26	34.03	-116.81	33.7	4.11	0.89	6.2	55	131
24	San Jacinto (1923)	-117.48	34.23	-117.26	34.03	4.11	0.89	6.5	30	137
25	Elsinore - Laguna Salada (Sierra Mayor)	-115.45	32.12	-115.02	31.85	4.11	0.89	7.2	50	126
26	Elsinore - Laguna Salada (Chupamieros 1934)	-115.58	32.29	-115.45	32.11	4.11	0.89	6.7	24	147
27	Elsinore - Laguna Salada (Laguna Salada 1899)	-115.82	32.5	-115.57	32.28	4.11	0.89	7.5	34	136
28	Elsinore - Laguna Salada (Coyote Mtn.)	-116.28	32.93	-115.89	32.7	4.11	0.89	7	44	125
29	Elsinore - Laguna Salada (Julian)	-116.97	33.34	-116.3	32.89	4.11	0.89	7.1	80	128
30	Elsinore - Laguna Salada (Temecula)	-117.37	33.65	-116.96	33.33	4.11	0.89	6.8	52	132
31	Elsinore - Laguna Salada (Glen Ivy)	-117.54	33.76	-117.29	33.64	4.11	0.89	6.3	27	119
32	Elsinore - Laguna Salada (Wittier Chino)	-118.24	34.15	-117.47	33.73	4.11	0.89	7	85	124
33	Tr. Ra. Thrusu system (multiple)	-118.25	34.25	-117.39	34.16	4.67	1.17	8.2	80	97
34	San Miguel - Vallecitos (southern 1956)	-115.92	31.69	-115.49	31.4	4.45	0.93	6.8	52	128
35	San Miguel - Vallecitos (Central)	-116.31	32.03	-115.9	31.72	4.45	0.93	6.9	52	132
36	San Miguel - Vallecitos (Northern)	-116.78	32.32	-116.09	32.01	4.45	0.93	7.5	74	118
37	Rose Canyon Newport - Inglewood (multiple)	-117.19	32.63	-117.05	32.23	4.46	1.16	6.8	47	163
38	Rose Canyon Newport - Inglewood (Mission Bay)	-117.28	32.87	-117.13	32.63	4.46	1.16	6.4	29	153
39	Rose Canyon Newport - Inglewood (La Nacion)	-117.11	32.82	-117	32.59	4.46	1.16	6.5	27	158
40	Rose Canyon Newport - Inglewood (del Mar)	-117.45	33.14	-117.27	32.86	4.46	1.16	6.6	35	151
41	Rose Canyon Newport - Inglewood (Pendleton)	-117.95	33.62	-117.41	33.16	4.46	1.16	7	72	136
42	Rose Canyon Newport - Inglewood (1933)	-118.2	33.84	-117.96	33.62	4.46	1.16	6.6	33	137
43	Agua Blanca - Coronado Bank (Valle de trinidad)	-116.09	31.41	-115.37	31.31	5.15	1.17	5.9	69	100
44	Agua Blanca - Coronado Bank (Santo Tomas)	-116.38	31.52	-116.07	31.44	5.15	1.17	5.9	32	107
45	Agua Blanca - Coronado Bank (Punta Banda Rdg.)	-116.59	31.66	-116.33	31.52	5.15	1.17	5.9	29	121
46	Agua Blanca Stomas	-116.9	31.72	-116.44	31.58	5.15	1.17	5.9	46	110
47	San Clemente (1)	-117.28	31.94	-116.64	31	4.46	1.16	5.9	121	150
48	San Clemente (2)	-117.6	32.12	-117.28	31.94	4.46	1.16	5.9	36	123
49	Coronado Bank	-117.37	32.61	-116.75	31.75	4.46	1.16	5.5	112	148
50	San Diego	-117.62	32.72	-116.9	31.72	4.46	1.16	5.5	130	149

a y b son las variables que describen la recta de la ecuación de Gutenberg y Richter

M_{max} es la magnitud máxima esperada para cada una de las fuentes sísmicas, considerada en este trabajo.

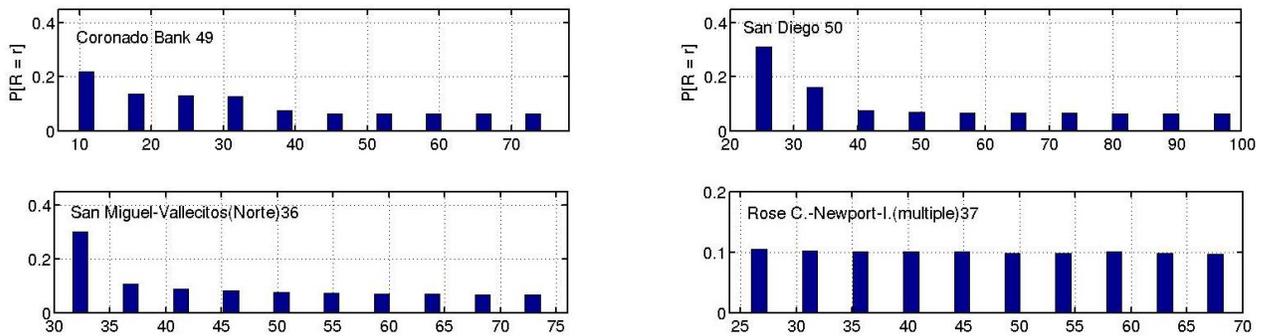


Figura 44. Distribuciones de probabilidad de que la distancia fuente-sitio de evaluación se encuentre en uno de los intervalos de distancia definidos.

En los histogramas notamos que la forma de éstos varía dependiendo de la ubicación de la fuente respecto al sitio en evaluación. En los cálculos de desagregado y del espectro de peligro uniforme, la distribución de probabilidades (para todas las fuentes) se calcula tomando como referencia un solo punto de interés. Sin embargo, en la generación de los mapas de peligro sísmico de este estudio, se utilizó una rejilla de 201 x 201 celdas, cada una con dimensiones de aproximadamente 1.7 km x 1.7 km. Esta rejilla de celdas cubrió la región norte de Baja California y sur de California que se muestra en la Figura 43.

Sismicidad en la región norte de Baja California. Como se mencionó en el Capítulo I, esta región se caracteriza por su continua actividad sísmica, la cual es inducida por el sistema de fallas San Andrés - Golfo de California. Esta región es tectónicamente activa debido a la interacción de las placas Norteamericana y del Pacífico.

En el cálculo de las distribuciones de probabilidad de magnitud se utilizaron los parámetros a y b de la ley de recurrencia sísmica de Gutenberg y Richter obtenidos por Munguía (2014). Estos parámetros se estimaron mediante un análisis de la sismicidad de la región norte de Baja California y el sur de California. Las regiones fueron divididas en las 9 zonas sísmicas mostradas en la Figura 45.

La magnitud máxima para cada línea o zona de fuentes se obtiene a partir de una revisión bibliográfica sobre el tema (Anexo III). La magnitud mínima se fijó en 4.5. Generalmente en estudios de peligro sísmico se toma esta magnitud, debido a que

sismos de menor magnitud no implicarían un riesgo para la sociedad (Morales *et al.*, 2012).

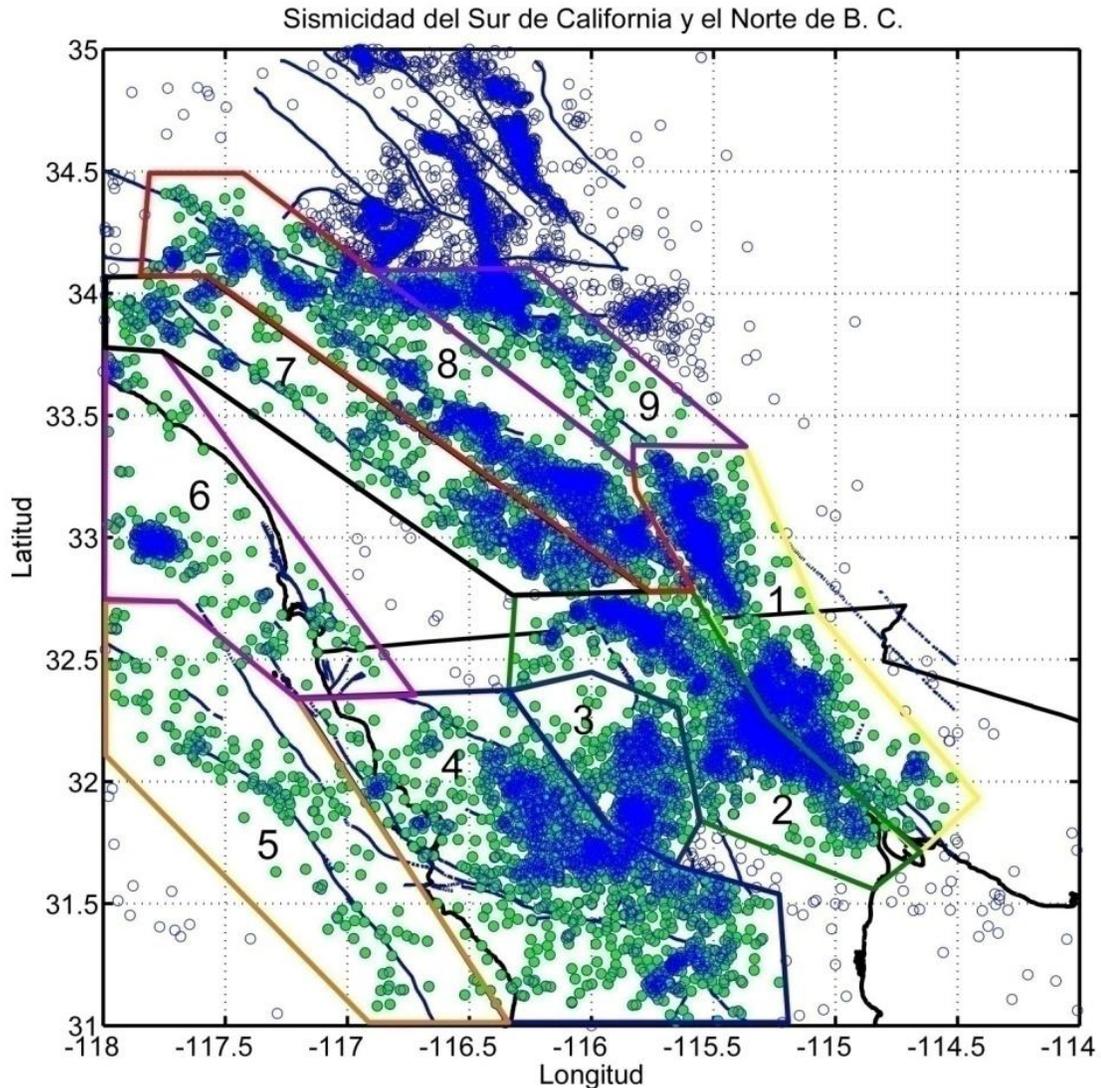


Figura 45. Áreas de sismicidad utilizadas en el cálculo de los parámetros a y b de la ley de Gutenberg y Richter que describen la sismicidad de cada zona. Tomada de Munguía (2014). Los círculos representan epicentros, los blancos están fuera de cualquier polígono, los verdes están dentro de alguno y el color azul indica gran densidad de epicentros.

La distribución de las probabilidades de magnitud se calculó con el programa EPSS14 de acuerdo a lo descrito en la sección 3.2.2. En todos los casos se utilizaron 10 intervalos de magnitud, que van desde la magnitud mínima (4.5) hasta la magnitud máxima esperada en cada zona, determinada en la revisión bibliográfica llevada a cabo o de los catálogos de sismicidad consultados (Tabla 4). En la Figura 46 se muestran

algunos de los histogramas de probabilidad de magnitud obtenidas para algunas de las líneas de fuentes consideradas.

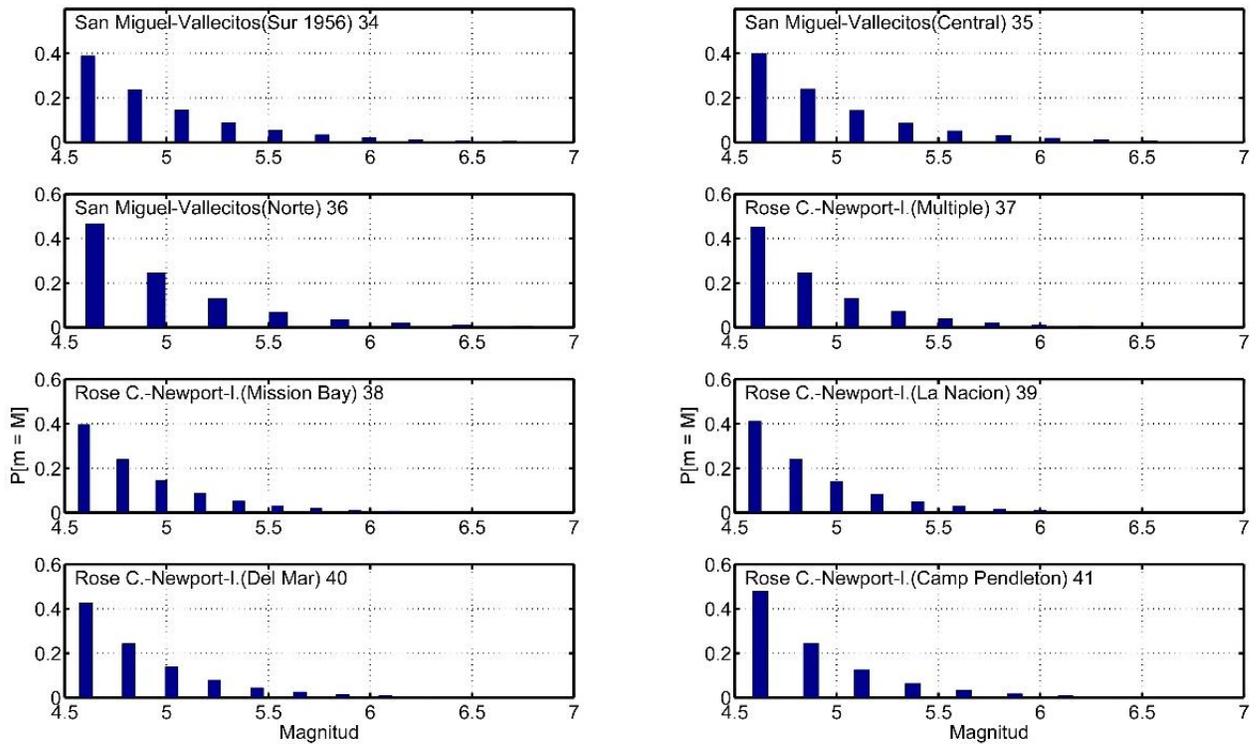


Figura 46. Distribuciones de probabilidad de magnitud para algunas de las fuentes consideradas.

Como se mencionó en la sección anterior, el modelo de atenuación de Boore y Atkinson (2008) se utilizó para estimar la intensidad del movimiento sísmico correspondiente a cada combinación de magnitud y distancia. En el programa se especifican los valores de distancia, magnitud y velocidad de las ondas de corte para los primeros 30 metros de profundidad en la corteza.

3.4. Resultados de peligro sísmico

En esta sección se muestran los resultados del peligro sísmico obtenidos al utilizar el método de Cornell (1968) descrito en la sección anterior, en combinación con el programa escrito por Luis Munguía (2014). Los resultados obtenidos consisten en:

- i. Mapas de peligro sísmico:

1. de aceleración horizontal pico
2. aceleración espectral a las frecuencias de vibración de los edificios estudiados en el Capítulo 2.
- ii. Desagregado de peligro sísmico para el sitio en donde se ubican los edificios en Puerto Salina y Tijuana
- iii. Cálculo del espectro de respuesta de aceleración de peligro sísmico uniforme para el sitio en donde se ubica el edificio en Puerto Salina.
- iv. Selección de un acelerograma de diseño.

3.4.1. Mapas de peligro sísmico

Utilizando el programa EPPS14 se obtuvieron mapas de peligro sísmico, de aceleración horizontal pico, y aceleración espectral. Las frecuencias utilizadas en los mapas de aceleración espectral fueron de 2.0 y 5.0 Hz, que corresponden, respectivamente, a las frecuencias fundamentales de vibración de los edificios de Puerto Salina y de Tijuana. Las Figuras 47, 48 y 49 muestran, respectivamente, mapas de peligro de aceleración horizontal pico, aceleración espectral a 2 Hz y aceleración espectral a 5 Hz, todos con 10% de probabilidad de excedencia en 50 años. Los mapas comprenden la región norte de Baja California y la región Sur de California. Los círculos color rosa en los mapas, representan las ciudades de Ensenada, Tijuana, Tecate y Mexicali. El área que se encuentra dentro del polígono demarcado por una línea rosa punteada define el área considerada como sedimentos y a la cual se le asignó una V_{S30} (velocidad de ondas de corte en los primeros 30 m) de 275 m/s (resultados para el Valle de Mexicali aún no publicados por Mario González y colaboradores), al resto del área se le asignó una V_{S30} de 760 m/s (Acosta *et al.*, 2009). La rejilla utilizada en los cálculos de este mapa consistió de 201 por 201 puntos de observación, con una separación entre éstos de 0.015 grados (~ 1.7 km).

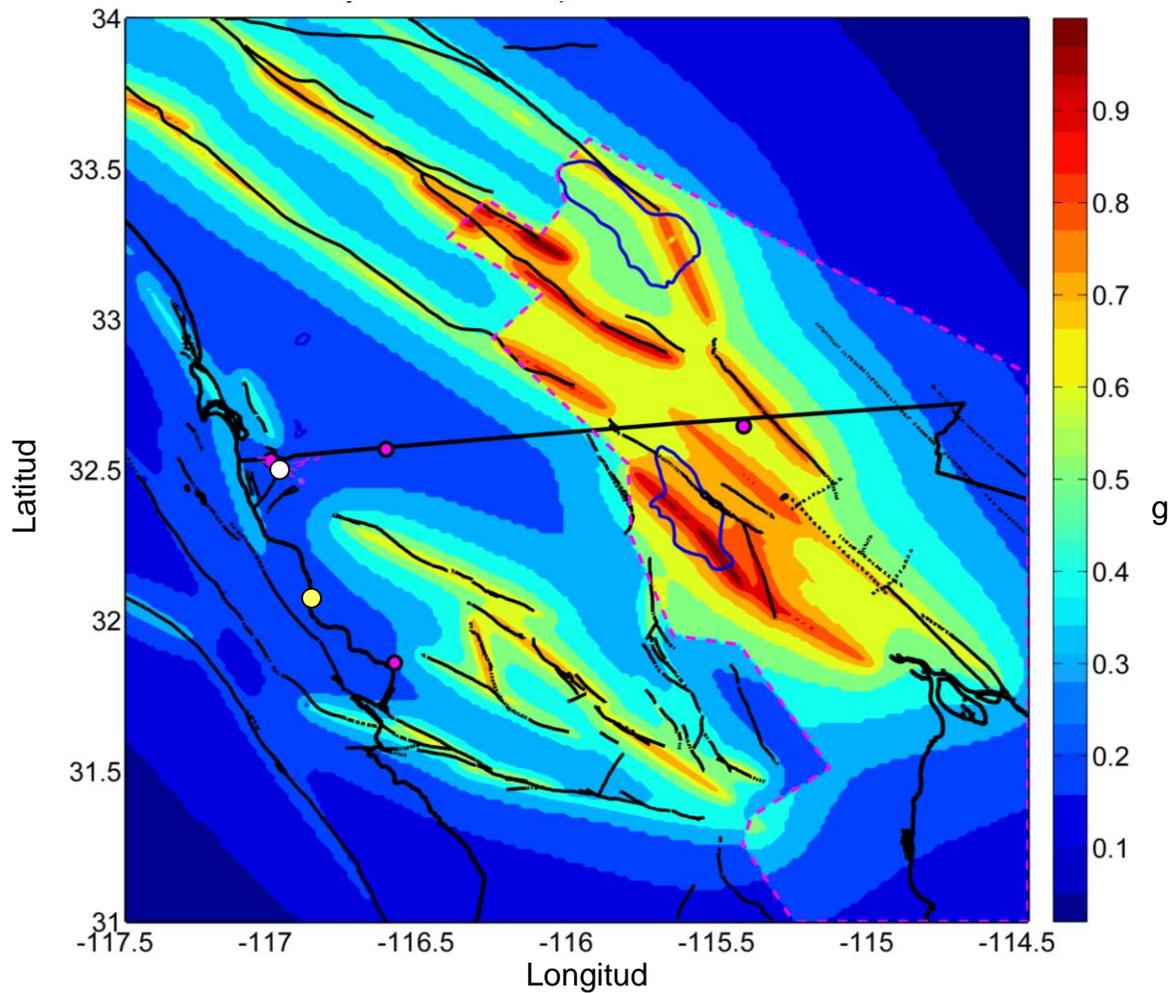


Figura 47. Mapa de peligro sísmico, de aceleración horizontal pico (g) con 10% de excedencia en 50 años. Los círculos en color blanco y amarillo indican los sitios donde se ubican los edificios en Tijuana y Puerto Salina respectivamente.

En el mapa anterior, los mayores valores de aceleración horizontal se presentan en el área del sistema de fallas San Andrés-Golfo de California, llegando hasta 0.9 g en el área de la Laguna Salada, Baja California. A su vez, en el área cercana al sistema San Miguel-Vallecitos, las aceleraciones pico están entre 0.3 g y 0.6 g. En la zona urbana de las ciudades de Tijuana y Ensenada la aceleración espectral tiene valores de entre 0.2 g y 0.3 g, lo mismo que en el sitio donde se ubica el edificio en Puerto Salina. En el área de la ciudad de Mexicali el valor de la aceleración es de aproximadamente 0.6 g.

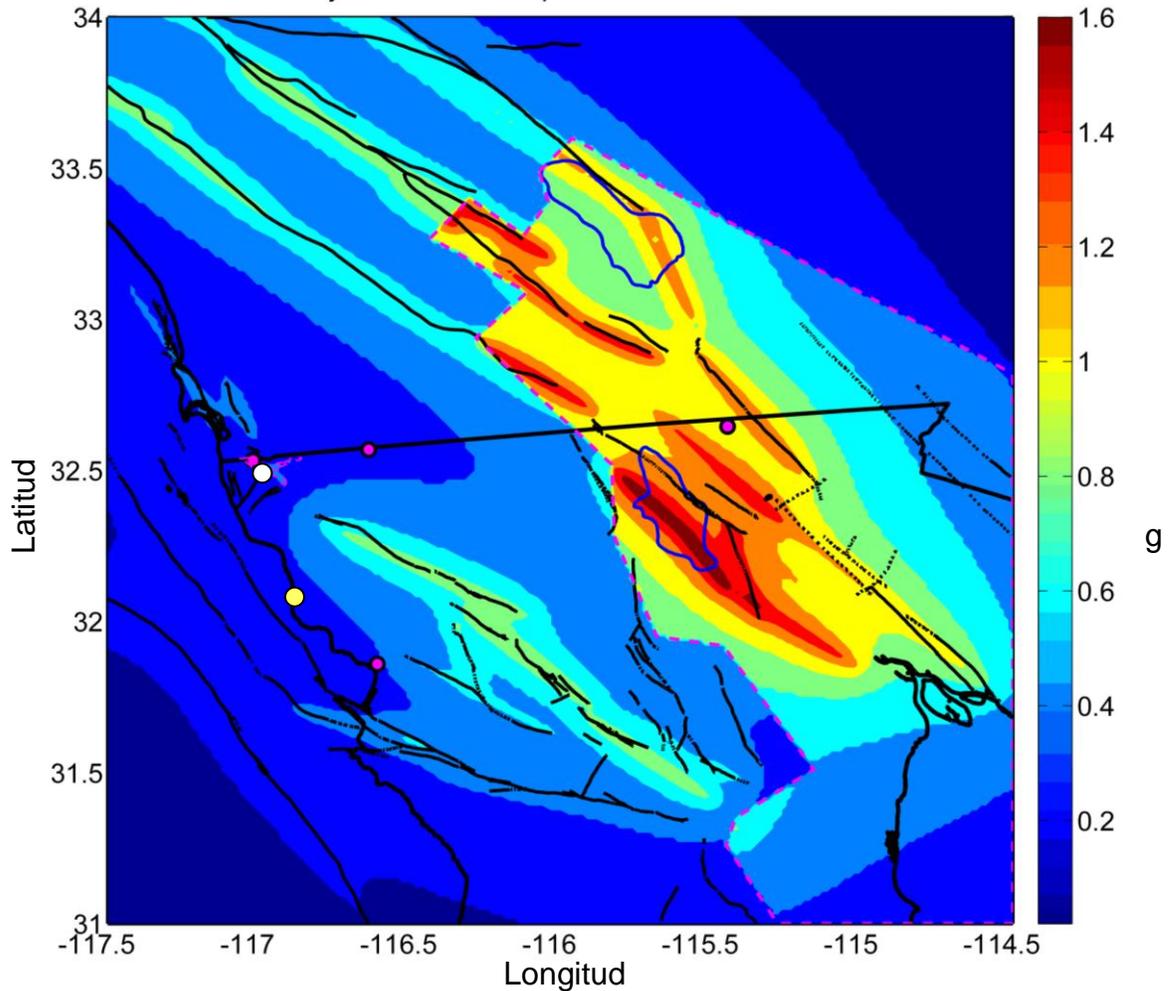


Figura 48. Mapa de peligro sísmico, de aceleración espectral (g), 10% de excedencia en 50 años, para un oscilador con frecuencia natural de 2 Hz (periodo 0.5 s) y 5% de amortiguamiento. Los círculos en color blanco y amarillo indican los sitios donde se ubican los edificios en Tijuana y Puerto Salina respectivamente.

En la figura anterior, de manera similar al mapa de la Figura 47, los mayores valores de aceleración espectral, se presentan en el área del sistema de fallas San Andrés-Golfo de California con valores de hasta 1.6 g en el área de la Laguna Salada, Baja California. En el área cercana al sistema San Miguel-Vallecitos, los valores de la aceleración espectral están entre 0.6 g y 0.8 g. En las ciudades de Tijuana y Ensenada la aceleración tiene valores entre 0.2 g y 0.4 g, al igual que en Puerto Salina. Tanto en el mapa de aceleración horizontal pico (Figura 47) como en el mapa de aceleración espectral (Figura 48), notamos que los valores de aceleración son fuertemente afectados en el interior del polígono que delimita el ambiente sedimentario del rocoso.

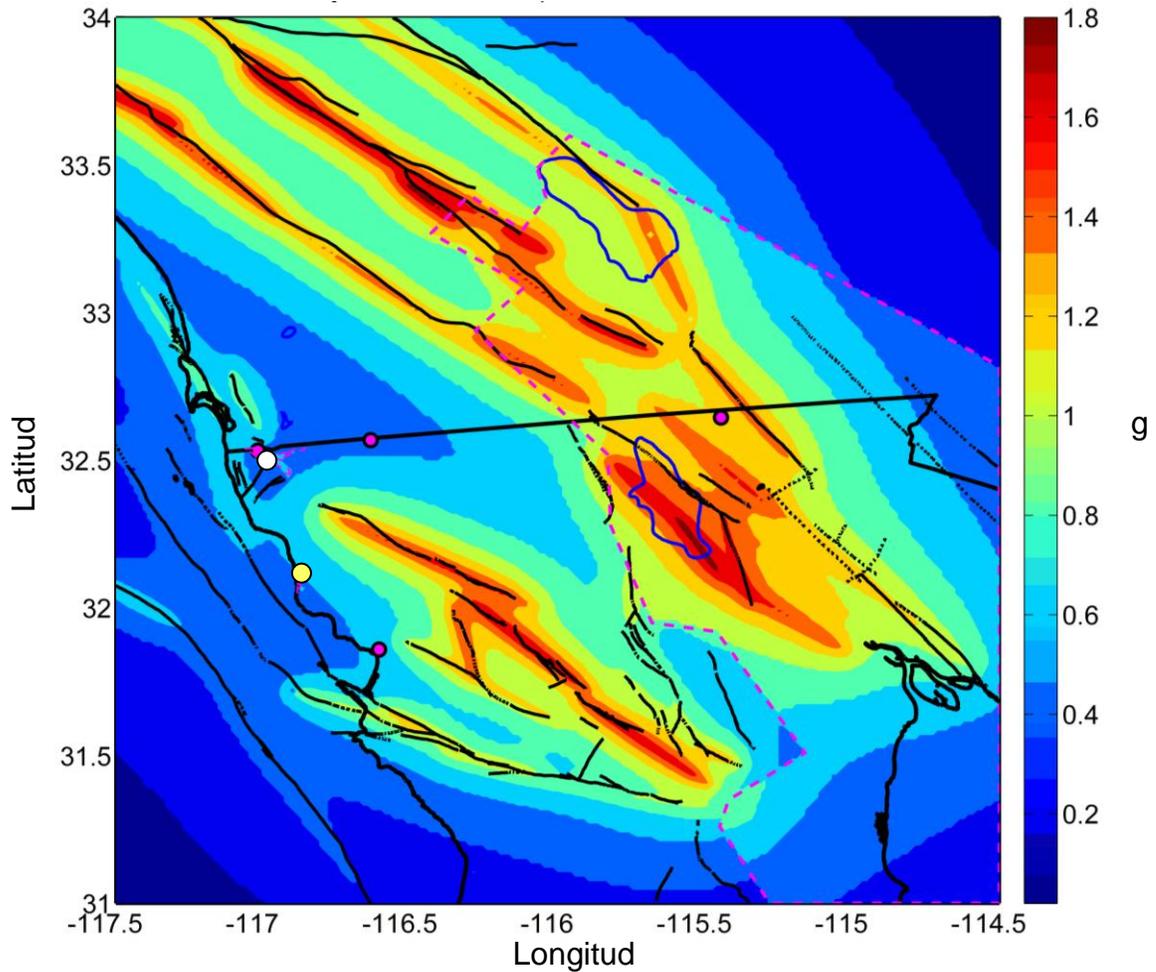


Figura 49. Mapa de peligro sísmico, de aceleración espectral (g), para un oscilador con frecuencia natural de 5 Hz (periodo 0.2 s) y 10% de excedencia en 50 años. Los círculos en color blanco y amarillo indican los sitios donde se ubican los edificios en Tijuana y Puerto Salina respectivamente.

En la Figura 49, los mayores valores de aceleración espectral también se presentan en el área del sistema de fallas San Andrés-Golfo de California, llegando a 0.9 g en el área de la Laguna Salada, Baja California. En este mapa podemos observar que el peligro en las fallas del sistema San Miguel-Vallecitos se observan aceleraciones de entre 1.6 g y 1.2 g. En las ciudades de Tijuana y Ensenada la aceleración tiene valores entre 0.4 g y 0.6 g, similar que el calculado para el sitio donde se ubica el edificio en Puerto Salina. En el área de la zona urbana de la ciudad de Mexicali el valor de la aceleración es de aproximadamente 0.6 g. En este mapa podemos observar que los valores de aceleración son menos afectados que los mapas anteriores por el polígono que delimita el ambiente sedimentario.

3.4.2. Desagregado de peligro sísmico para La Salina

Con el uso del programa EPPS14 también se obtuvo el desagregado de peligro sísmico para los sitios de los edificios descritos en la sección 1.4 (en Tijuana y Puerto Salina). En la Figura 50 se muestran las curvas de peligro sísmico, de aceleración espectral, para un periodo de 2 Hz (frecuencia natural de vibración del edificio en Puerto Salina) y amortiguamiento de 5%, el cual es prescrito en la mayoría de los reglamentos de construcción, ya que es representativo para la mayoría de las estructuras (Bazan y Meli, 2004).

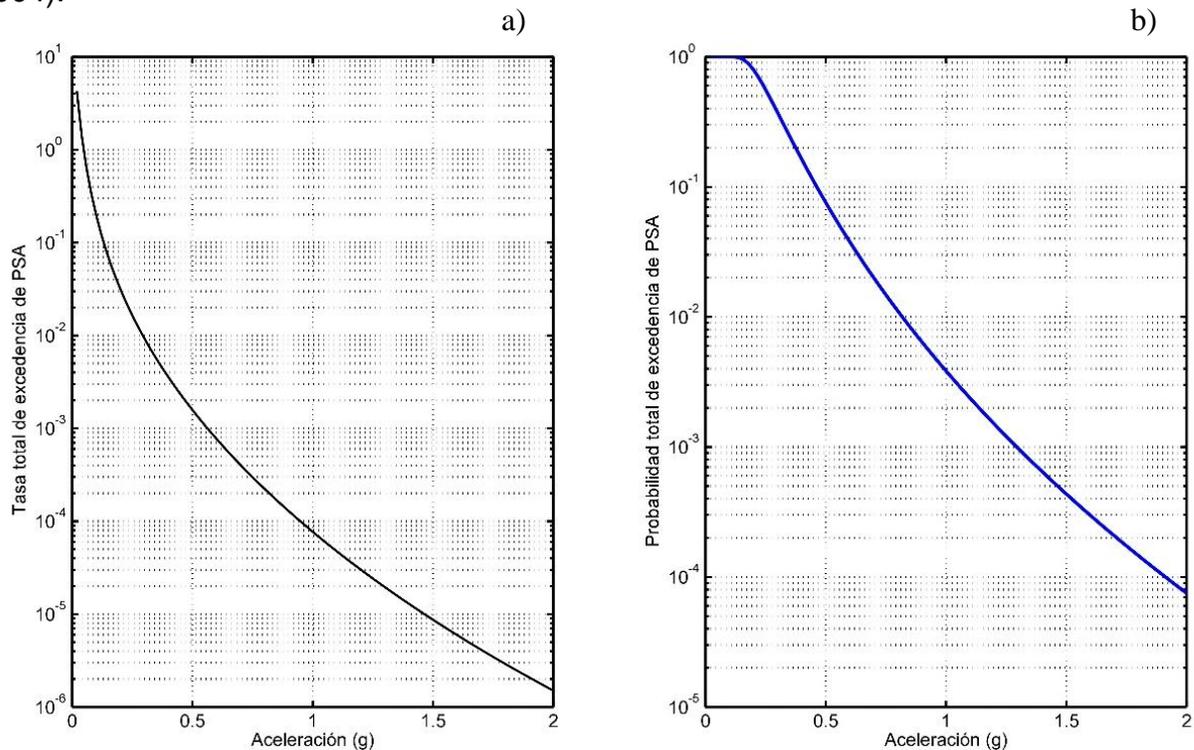


Figura 50. Curvas de peligro sísmico de aceleración espectral, para el sitio del edificio ubicado en Puerto Salina. a) Tasa anual de excedencia del parámetro de aceleración espectral. b) Probabilidad de excedencia de la aceleración espectral.

En las curvas anteriores se muestra la contribución total de cada una de las fuentes consideradas. Sin embargo, en la Figura 51, el peligro sísmico se muestra de una manera más clara. En esta figura se observa la contribución al peligro en el sitio de interés por cada uno de los segmentos de falla considerados. La probabilidad de excedencia de 0.3 g (aceleración espectral de un oscilador con un periodo natural de 0.5 s y amortiguamiento de 5%) es 37.3% en 50 años. Es importante calcular el desagregado de peligro, de aceleración espectral a 0.5 s (periodo fundamental de

vibración del edificio en Puerto Salina), para poder identificar la magnitud y distancia al sitio del sismo o sismos que contribuyen en mayor medida al peligro sísmico. De acuerdo a la gráfica de cocientes espectrales (Figura 27), la amplificación del edificio es considerablemente mayor a la amplificación del suelo en este sitio (Figura 30). Por lo tanto, resulta de mayor importancia en este caso en particular calcular el desagregado para la frecuencia del edificio. Estos datos serán de utilidad para poder seleccionar un sismo de diseño apropiado para ese edificio. Es de interés notar que las fallas más alejadas del sitio en estudio no contribuyen al peligro aún cuando éstas pudieran generar sismos fuertes. Esto es una consecuencia de las distancias grandes entre el sitio y las posibles fuentes. Por otro lado, la figura muestra que fallas cercanas, pero con ocurrencia de sismos de magnitud baja, tampoco contribuyen de manera significativa al peligro sísmico en el sitio.

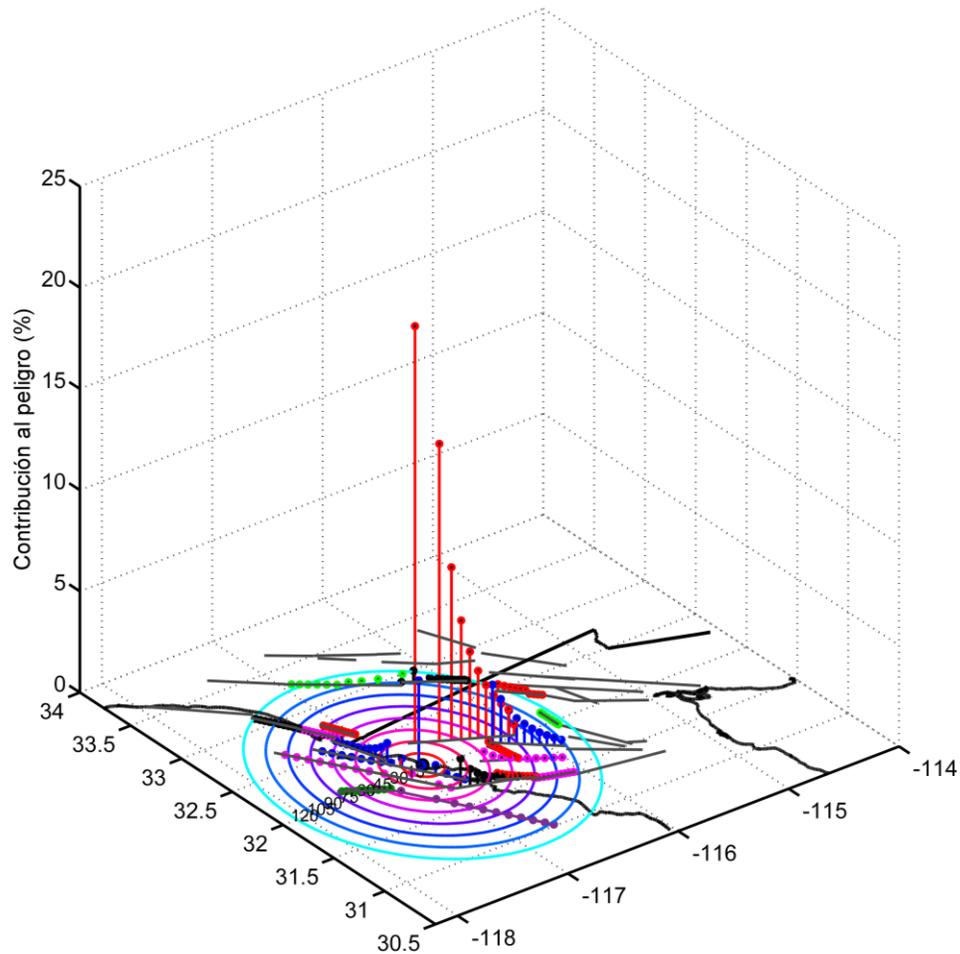


Figura 51. Desagregado de peligro sísmico estimado en el sitio del edificio de Puerto Salina (punto azul ubicado al centro de los círculos). Las líneas verticales representan la contribución al peligro de cada uno de los segmentos de falla considerados. Mientras más larga sea la longitud de estas líneas, mayor es la contribución al peligro.

En la figura anterior, podemos ver que la mayor contribución al peligro sísmico está dada por el segmento de falla 36, el cual corresponde al segmento norte del sistema de fallas San Miguel-Vallecitos. Podemos notar también que la contribución más relevante al peligro está dada en los segmentos ubicados dentro de 70 km del sitio en estudio. Las fallas Coronado Banks y San Diego a pesar de estar a una corta distancia al punto de observación no contribuyen significativamente al peligro sísmico. Lo anterior debido a que la máxima magnitud considerada para esas fallas es de 5.9, mientras que para la falla Vallecitos se consideró una magnitud máxima de 7.

En la Figura 52 se presenta la contribución al peligro sísmico en forma de histograma en 3 dimensiones. Uno de los ejes horizontales muestra intervalos de magnitud mientras que el otro muestra intervalos de distancia. La figura, aunque indica que la mayor contribución al peligro proviene de sismos con magnitudes de entre 6 y 7, localizados a distancias de entre 30 y 45 km del sitio, no proporciona información acerca de la ubicación geográfica de esos sismos. Sin embargo, es claro que esta información sí es proporcionada en la Figura 51. Los resultados mostrados en ambas figuras son congruentes entre sí.

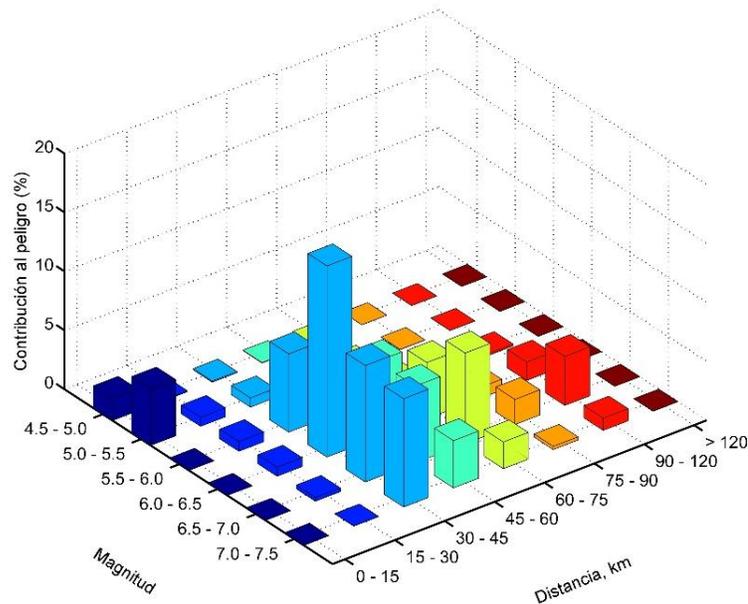


Figura 52. Contribuciones al peligro sísmico total de todos los segmentos de falla considerados.

A manera de ejemplo, en la Figura 53 se muestra la contribución al peligro sísmico planteado individualmente por la falla San Miguel-Vallecitos en el sitio Puerto Salina. La figura muestra que conforme la distancia al sitio de interés es mayor la contribución al peligro es menor. En cada uno de los ejes horizontales se muestra el índice de magnitud o distancia. Con respecto a la distancia, el índice 1 corresponde a la distancia más corta, el 11 a la más larga y los demás índices corresponden a intervalos intermedios de distancia. En forma similar se interpreta para el caso de las magnitudes. Notamos que la mayor contribución en esta fuente está dada por sismos con una magnitud intermedia (índices 6 a 8). La Figura 54 muestra la contribución al peligro de la falla Vallecitos (segmento 36). En esta figura notamos que conforme la distancia al sitio es menor, la contribución del peligro a la fuente es mayor. Cada barra en el histograma sobre la fuente corresponde a la contribución al peligro de un intervalo de distancia, con la contribución en éste de todos los intervalos de magnitud considerados.

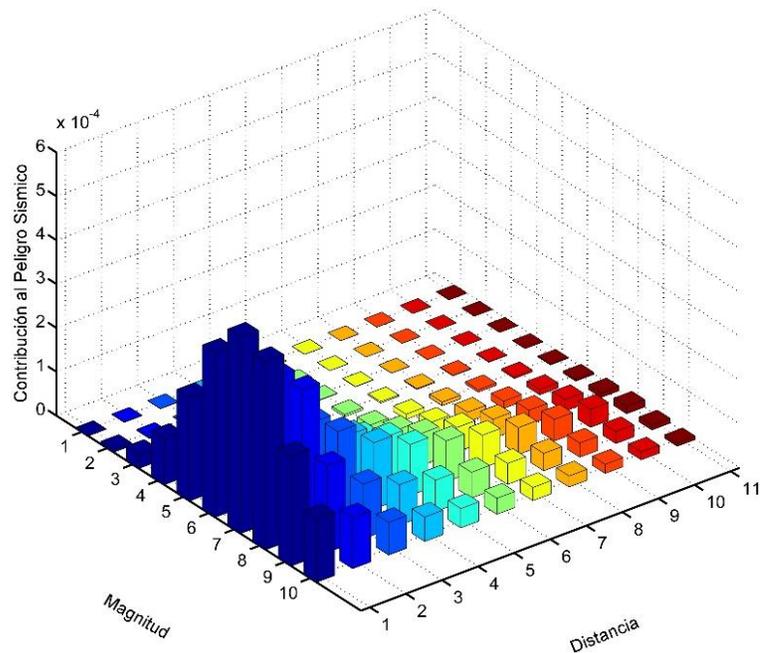


Figura 53. Contribución al peligro en La Salina de cada una de las combinaciones de magnitud-distancia de la falla Vallecitos.

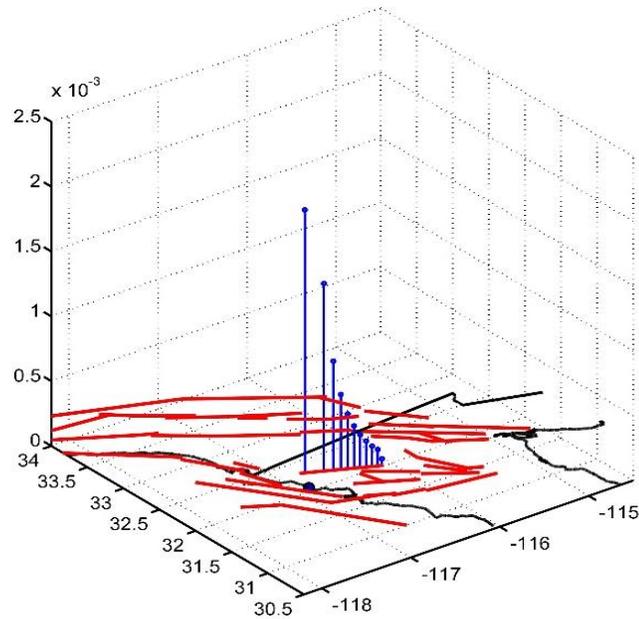


Figura 54. Contribución individual de la falla Vallecitos al peligro sísmico en el sitio de interés (punto negro).

3.4.3. Desagregado de peligro para el sitio en Tijuana.

En la Figura 55 se muestran curvas de peligro sísmico, de aceleración espectral, para un periodo de 2 s y amortiguamiento de 5%. En este caso a diferencia del edificio de Puerto Salina, la amplificación tanto de la frecuencia de vibración del edificio como la de los sedimentos son similares (Figura 26) y por lo tanto igualmente importantes, en este caso se calcularon las curvas para el periodo fundamental de vibración del edificio, ya que el efecto de amplificación del movimiento del suelo ya se consideró implícitamente en la ecuación predictiva de movimientos fuertes. Estas curvas fueron calculadas tomando como sitio de observación el lugar del Edificio en Tijuana. Las curvas son útiles en el cálculo de espectros de peligro uniforme, como se describe más adelante. Las ecuaciones con las cuales se calcularon estas curvas fueron expuestas en la sección 3.2.4.

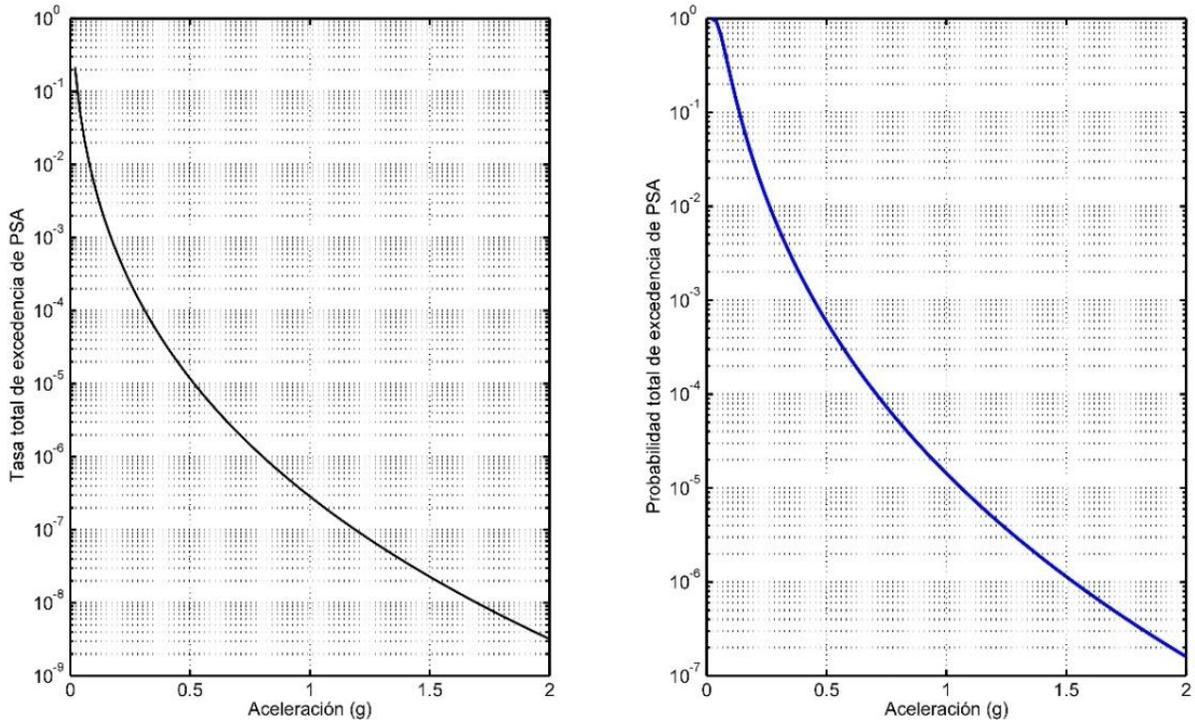


Figura 55. Curvas de peligro sísmico de aceleración espectral en el sitio donde se ubica el edificio en Tijuana. a) Tasa anual de excedencia. b) Probabilidad de excedencia.

En la Figura 56 se muestra un mapa con la contribución al peligro de cada una de las fuentes consideradas. Esta contribución fue graficada sobre cada uno de los segmentos de falla. En esta ubicación la probabilidad de excedencia de 0.3 g (aceleración espectral, de un oscilador con un periodo de 2 s y 5% de amortiguamiento) es 0.58% en 50 años. La probabilidad de excedencia de este valor de aceleración espectral es mucho menor que en Puerto Salina.

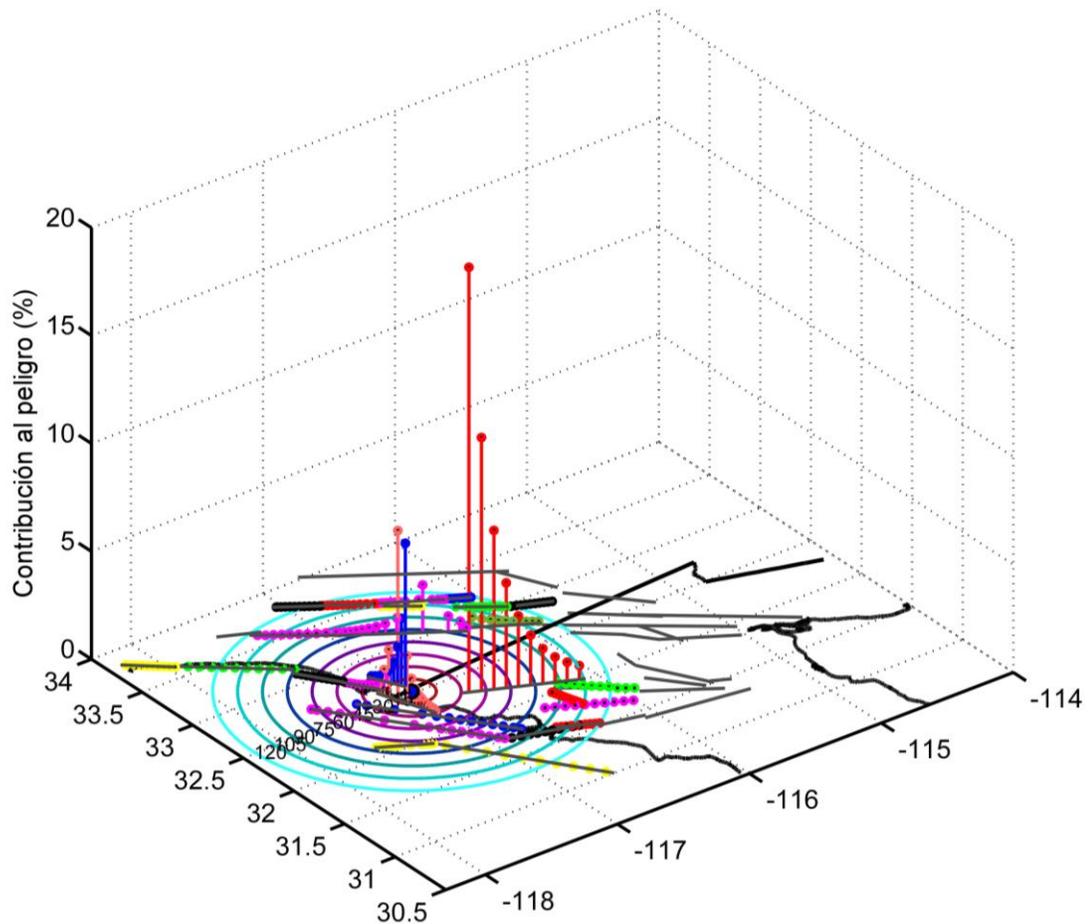


Figura 56. Contribución al peligro sísmico de cada uno de los segmentos de falla en el sitio donde se ubica el edificio en Tijuana.

En la figura anterior se observa que la mayor contribución al peligro, de la misma manera que en el sitio ubicado en Puerto Salina, está dada por el segmento 36, que corresponde al segmento norte del sistema San Miguel-Vallecitos. La contribución al peligro, similar al caso de Puerto Salina, está dada en los segmentos, a no más de 70 km. Las fallas Mission Bay y La Nación también contribuyen, pero en menor medida, dado que la máxima magnitud considerada para esas fallas es de 6.4 y 6.5 respectivamente.

En la Figura 57 se presenta la contribución al peligro sísmico, en forma de histograma en 3 dimensiones, para el sitio ubicado en Tijuana. En esta figura se observa que la mayor contribución al peligro proviene de sismos con magnitudes de entre 7 y 7.5 y a distancias de entre 30 y 45 km. También hay una importante contribución (de

aproximadamente 10%), de sismos con magnitudes de entre 6.0 y 6.5, a una distancia menor a 15 km. Lo cual es congruente con lo mostrado en la figura anterior.

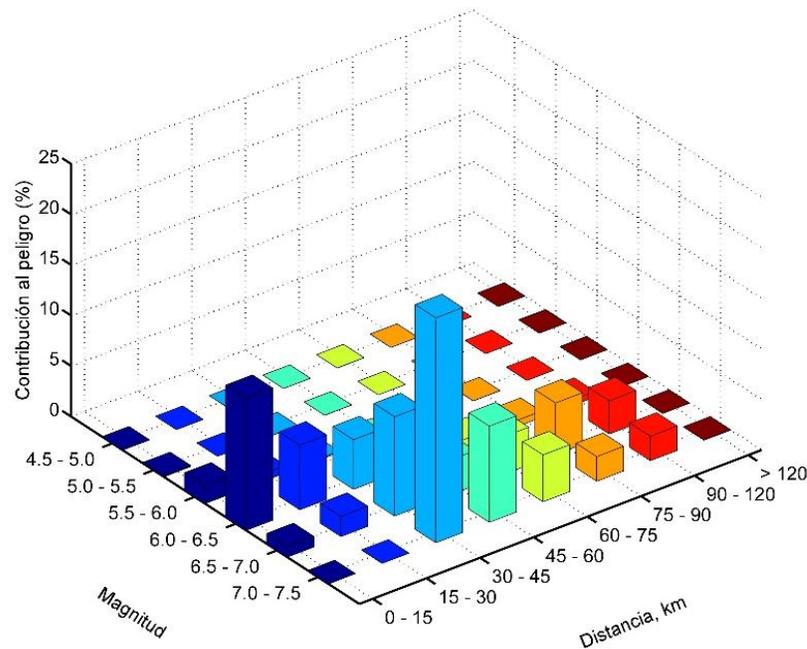


Figura 57. Contribución al peligro sísmico en Puerto Salina, de todos los segmentos.

En la Figura 58 se muestra la contribución al peligro de la falla Vallecitos de cada combinación magnitud-distancia. En ella podemos notar que conforme la distancia es mayor la contribución al peligro es menor. En cada uno de los ejes horizontales se muestra el índice de magnitud o distancia. El índice 1 corresponde a la distancia más corta, el 20 a la distancia más larga y los demás corresponden a los intervalos intermedios. También notamos que la mayor contribución en esta fuente está dada por sismos con una magnitud de alrededor de 7. La Figura 59 muestra en un mapa la contribución al peligro de la falla Vallecitos.

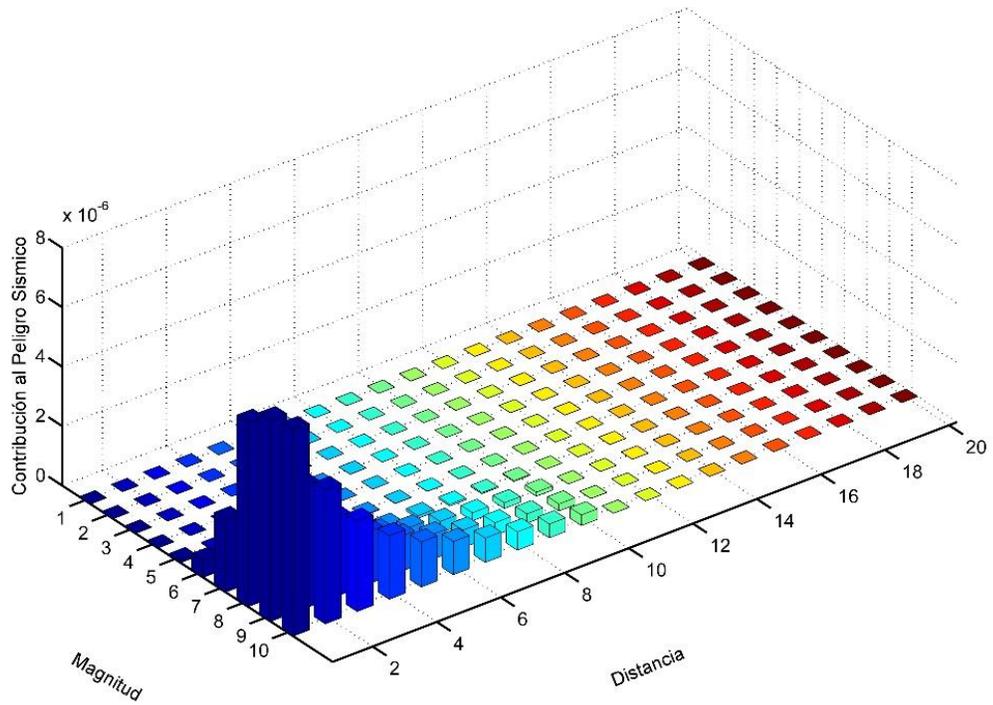


Figura 58. Contribución al peligro sísmico en el sitio donde se ubica el edificio en Tijuana, de la falla Vallecitos.

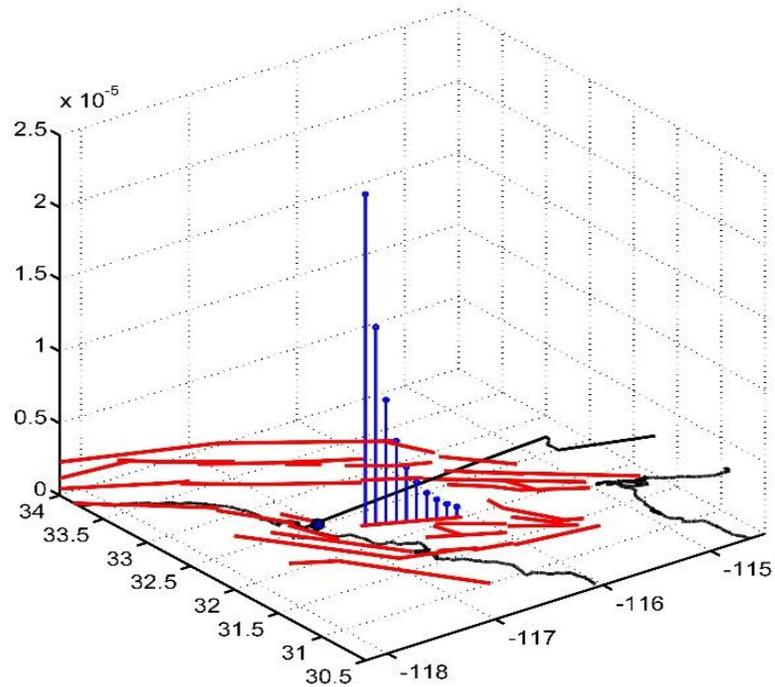


Figura 59. Contribución al peligro de la falla Vallecitos para el sitio donde se ubica el edificio de Tijuana.

3.4.4 Espectro de Peligro Uniforme

El procedimiento para calcular el espectro de peligro uniforme es el siguiente. Primero se calculan curvas de peligro sísmico, de aceleración espectral, para distintos periodos fundamentales de vibración y un mismo amortiguamiento. Después, de cada una de las curvas de peligro sísmico generadas para los distintos periodos, se extrae el valor de aceleración con una misma probabilidad de ser excedida en un cierto intervalo de tiempo (por ejemplo, la aceleración con 10% de probabilidad de excedencia en 50 años). Finalmente, los valores de aceleración se grafican en función de los periodos fundamentales correspondientes. Este tipo de espectro, cuyos niveles de aceleración tienen la misma probabilidad de ser excedidas, es de utilidad en ingeniería sísmica para la selección de sismogramas de diseño, como se ilustra en la siguiente sección.

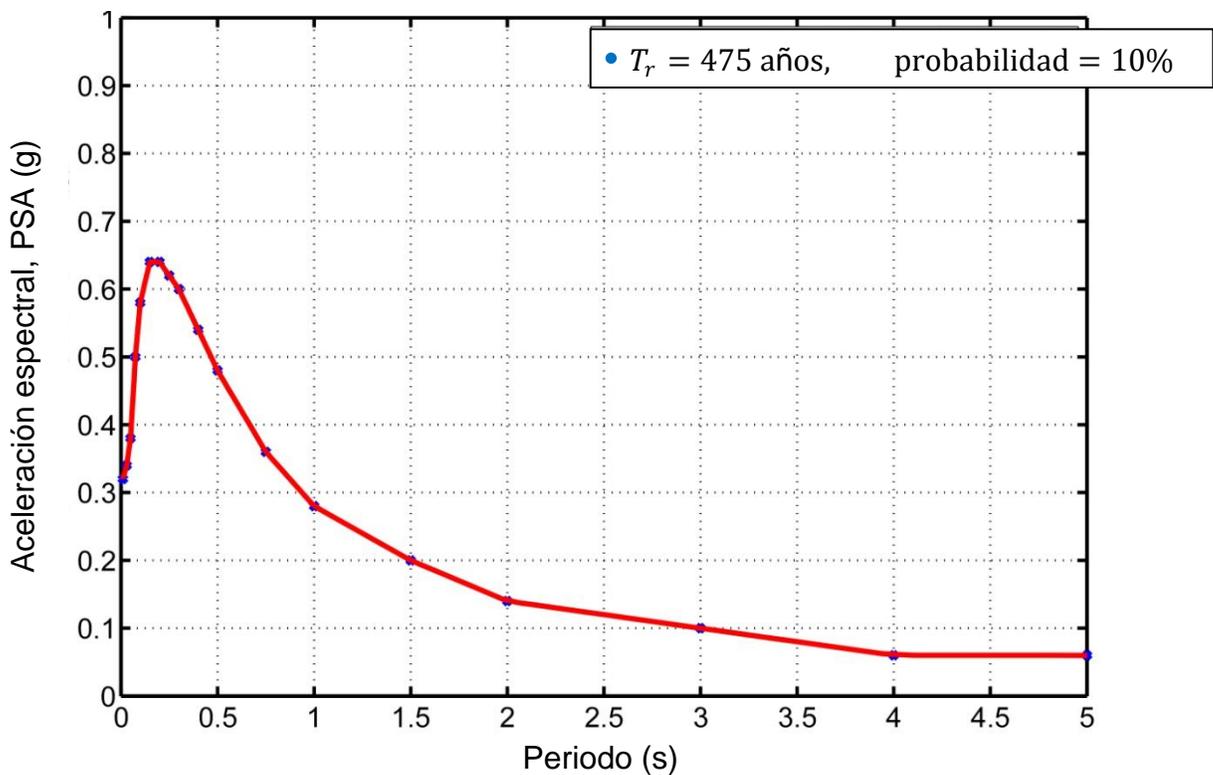


Figura 60. Espectro de aceleración de peligro sísmico uniforme para el sitio en donde se ubica el edificio en Puerto Salina.

3.5. Selección del registro de diseño para el sitio de Puerto Salina

Una vez calculado el espectro de aceleración de peligro sísmico uniforme, se buscaron registros de sismos que tuvieran las características determinadas a partir del desagregado de peligro para el sitio en Puerto Salina. La búsqueda se realizó en las bases de datos del Centro de Información de Movimientos Fuertes para Ingeniería (CESMD, por sus siglas en inglés) y en la de Red de Acelerógrafos del Noroeste de México (RANM). Las características buscadas fueron: sismos con magnitudes entre 6 y 7, registrados en sedimentos y a distancias epicentrales de entre 30 y 35 km y con aceleración pico de $\sim 0.3g$. Se encontraron 6 registros que cumplían con estas características, dos registros del sismo Coalinga (2004 y 1983), dos del sismo Morgan Hill (1984) y dos del sismo Northridge (1994). Para cada uno de estos registros se calculó su espectro de respuesta (Biot, 1932) y se comparó con el espectro de respuesta de peligro sísmico uniforme calculado. El registro producido por el sismo de Morgan Hill fue el registro elegido, con base en que su espectro de respuesta presentó los menores residuales en dicha comparación. En la Figura 61 se muestran las tres componentes de aceleración registradas para este sismo en la estación número 57382 (San Ysidro School).

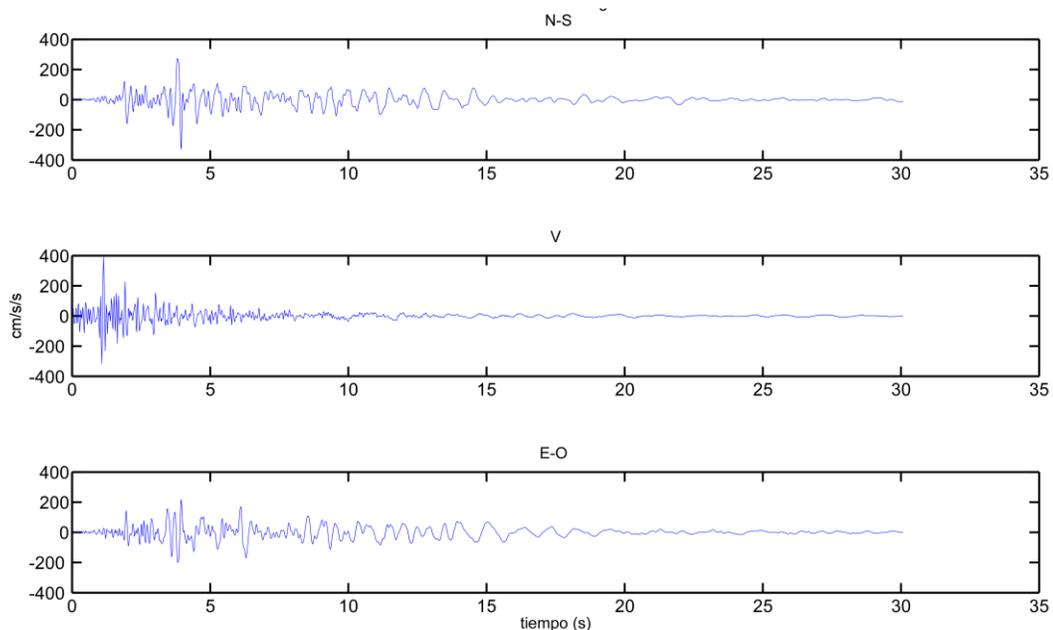


Figura 61. Acelerogramas del sismo de Morgan Hill, registrados en la estación 57382 y elegidos en este trabajo como registro de diseño. Datos obtenidos del Centro de Información de Movimientos Fuertes para Ingeniería (CESMD, por sus siglas en inglés) disponibles en <http://www.strongmotioncenter.org>

El registro tiene una longitud de 60 s y un intervalo de muestreo de 0.02 s. Este sismo ocurrió el 24 de abril de 1984 a las 21:15:18.9 (hora GMT) en las coordenadas 34.215° Norte, 118.538° Oeste, y a una profundidad de 18 km. La Figura 62 muestra el espectro de respuesta calculado de la componente N-S de la figura anterior. Con base en esta componente de aceleración, se calculó también el espectro de diseño de Newmark y Hall (1982), el cual se muestra superpuesto en la Figura 62. El espectro de diseño se utiliza en el Capítulo 4 para calcular la respuesta del edificio de Puerto Salina, a partir de un análisis modal y también mediante el uso de la función de transferencia del edificio.

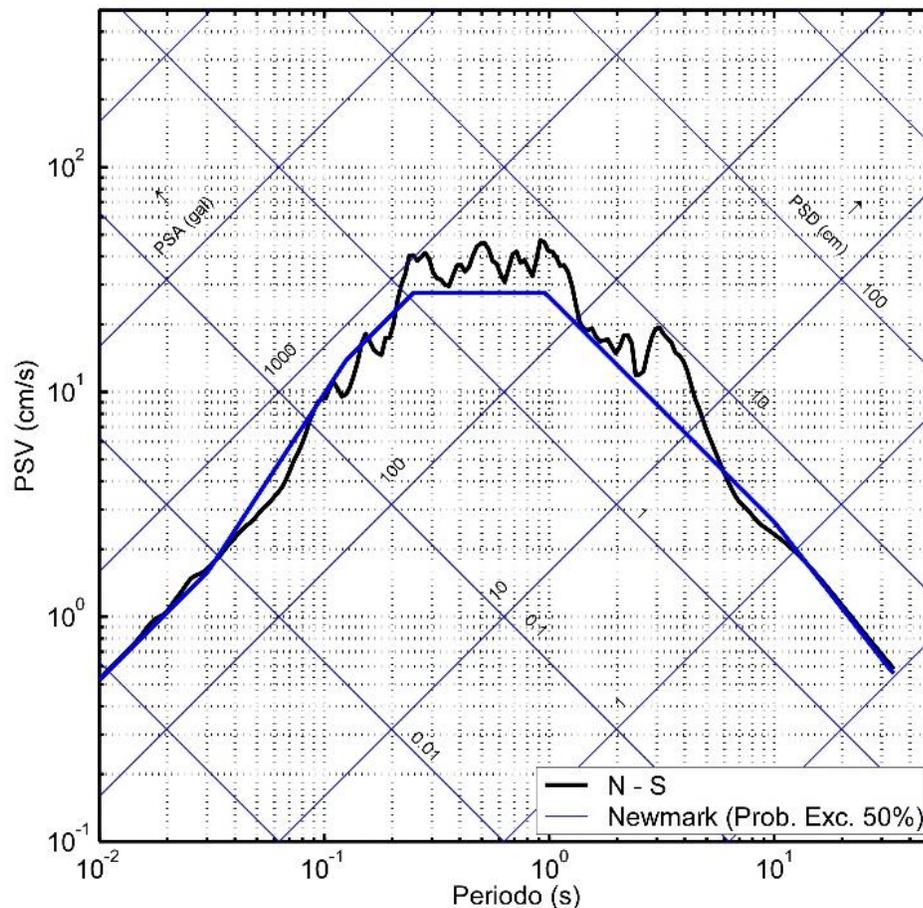


Figura 62. Gráfica tripartita del espectro de respuesta calculado con la componente norte sur del registro del sismo de Morgan Hill (línea negra) y su espectro de diseño (línea azul).

En la Figura 63, la línea roja es el espectro de peligro uniforme obtenido de nuestro análisis de peligro sísmico. Las líneas grises muestran algunos espectros de respuesta de registros que cumplieron con las características mencionadas en la sección 2.2.4. La

línea negra corresponde al espectro de respuesta de la componente norte sur del registro que presentó el menor residual respecto al espectro de peligro uniforme. Con línea azul se muestra el espectro de diseño de este registro. Los espectros graficados en color rosa son los que especifican las normas técnicas estructurales de la ley de edificaciones del Estado de Baja California (Secretaría de Infraestructura y Desarrollo Urbano del Estado de Baja California, 2013). Uno de estos corresponde al espectro de la zona B, tipo de suelo I (suelo blando), el otro corresponde a la zona C, tipo de suelo III (suelo rocoso), el resto de los espectros descritos en estas normas se encuentran entre estos dos espectros. La zonificación del Estado de Baja California, de acuerdo a las normas técnicas, se muestra en la Figura 64.

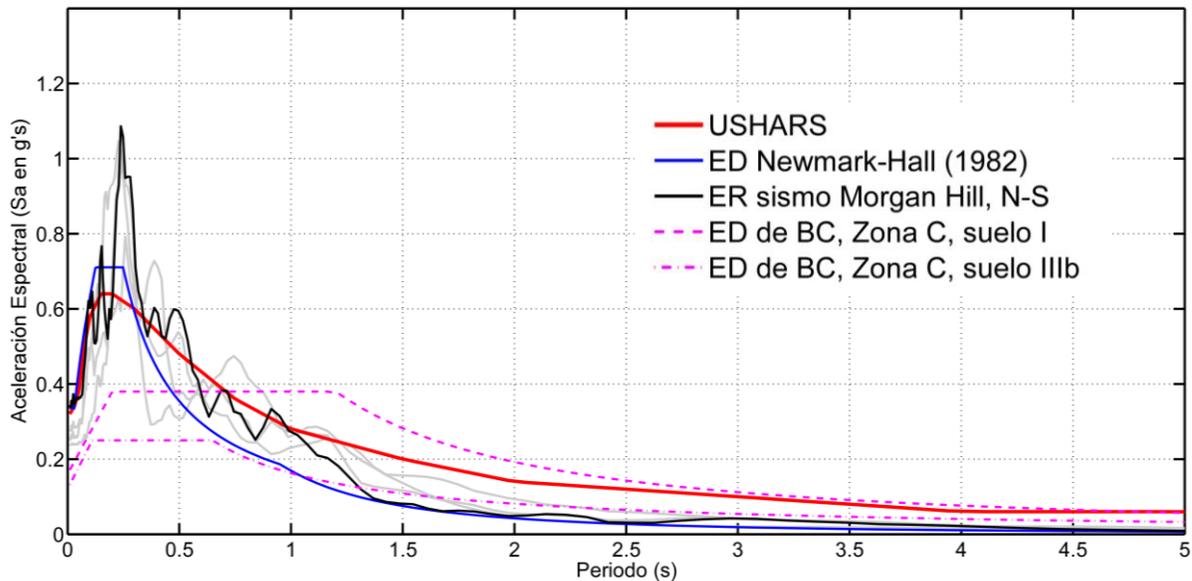


Figura 63. Espectros de respuesta involucrados en el desarrollo de la tesis.

El espectro de diseño de Newmark y Hall de este registro, a pesar de estar truncado en la cresta, tiene un valor de aceleración mayor que el espectro de peligro uniforme en periodos entre 0.15 y 0.3 s. El espectro de diseño de las normas técnicas de la zona C (tipo de suelo I), es similar al espectro de respuesta de peligro uniforme a periodos por arriba de 3 s. Este espectro de las normas técnicas está truncado entre 0.2 y 1.3 s, y a periodos más bajos el valor de la aceleración es menor que la del espectro de peligro uniforme. Esto probablemente se deba a que la ecuación predictiva de movimientos fuertes fue obtenida para el sur de California.



Figura 64. Mapa de la zonificación designada para el estado de Baja California, tomado de las Normas técnicas complementarias del Estado de BC.

Tanto el espectro de peligro sísmico uniforme calculado, como el espectro de Newmark y Hall, obtenido a partir del registro de la componente N-S del sismo de Morgan Hill, tienen valores de aceleración mayores que son hasta 1.7 veces mayores que los del espectro de la zona C, suelo I, descrito en las normas técnicas complementarias de Baja California.

En la Tabla 5 se muestra un resumen de los resultados obtenidos a partir del desagregado de peligro sísmico. En ambos sitios la mayor contribución al peligro sísmico está dada por la falla norte del sistema San Miguel-Vallecitos, que se encuentra aproximadamente a la misma distancia de ambos sitios, lo cual es congruente con los resultados de magnitud y distancia que contribuyen en mayor medida en ambos sitios. En la cuarta columna de la Tabla 5 se presenta el valor de aceleración obtenido a partir del mapa de peligro sísmico de aceleración horizontal pico.

Tabla 5. Resultados obtenidos a partir del desagregado de peligro sísmico.

Características del sismo que plantea mayor peligro			
Edificio	Distancia fuente-sitio (km)	magnitud	aceleracion pico (g)
Tijuana	30-45	6-7	0.2-0.3
<i>La Salina</i>	<i>30-45</i>	<i>6-7</i>	<i>0.2-0.3</i>

El sismograma de diseño y su espectro de diseño, obtenidos a partir de los resultados mencionados en la tabla anterior (marcados con cursivas), se utilizan en el siguiente capítulo para calcular la respuesta dinámica del edificio ubicado en Puerto Salina.

Capítulo 4. Respuesta estructural

En este capítulo se analiza la respuesta del edificio ubicado en Puerto Salina, a partir de los resultados obtenidos en el capítulo anterior (sismograma de diseño y espectro de diseño de Newmark y Hall, 1982). Esto se realiza utilizando 3 métodos de análisis, los cuales son: a) el método descrito por Kramer (1996) para sistemas con múltiples grados de libertad; b) un modelo del edificio definido en un software comercial (SAP2000, versión 12); y c) con la función de transferencia del edificio, obtenida en el Capítulo 2 para algunos de sus niveles.

Un primer objetivo de este capítulo es determinar el periodo fundamental de vibración del edificio a partir de los dos primeros análisis mencionados, para compararlos con el periodo fundamental obtenido en el Capítulo 2 con mediciones de vibración ambiental. El segundo objetivo es obtener los desplazamientos en distintos niveles de la estructura utilizando los 3 métodos mencionados, con el propósito de determinar si estos desplazamientos cumplen con lo establecido en las normas técnicas de construcción del estado de Baja California.

4.1. Sistemas con múltiples grados de libertad (SMGDL)

Las estructuras que son de interés en ingeniería (presas, puentes, edificios altos, etc.) tienen múltiples grados de libertad (Kramer, 1996). Como ejemplo, en la **Figura 65** se muestra una estructura con 3 grados de libertad, a cada uno de los cuales está asociado un desplazamiento horizontal u_n , de cada una de las masas m_n . La estructura se deforma bajo la acción del movimiento sísmico u_g actuando en su base.

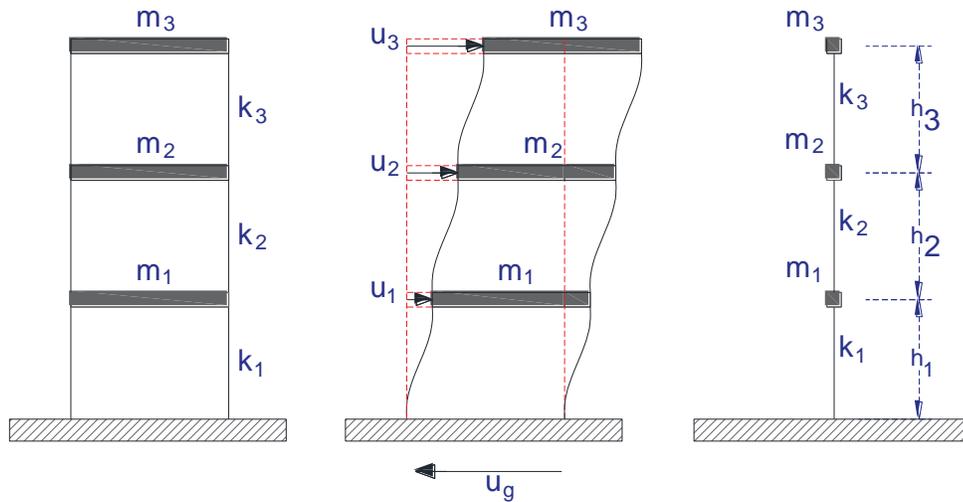


Figura 65. Diagrama de un edificio. a) Sin deformar, b) deformado, c) diagrama de cuerpo libre.

En ausencia de amortiguamiento la ecuación de equilibrio para esta estructura establece:

$$m\ddot{u} + ku = 0. \quad (32)$$

Dando por hecho que la respuesta de cada masa (grado de libertad) es armónica, tenemos que:

$$u(t) = A_n \cos \omega_n t + B_n \text{sen} \omega_n t. \quad (33)$$

A partir de la ecuación (32) podemos obtener las ecuaciones de movimiento para cada nivel, las cuales son:

$$m_3 \ddot{u}_3 + k_3(u_3 - u_2) = 0, \quad (34)$$

$$m_2 \ddot{u}_2 + k_3(u_2 - u_3) + k_2(u_2 - u_1) = 0, \quad (35)$$

$$m_1 \ddot{u}_1 + k_1 u_1 + k_2(u_1 - u_2) = 0. \quad (36)$$

Escribiendo las ecuaciones anteriores en forma matricial tenemos:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \\ \ddot{u}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} = 0. \quad (37)$$

Si la aceleración absoluta \ddot{u} es igual a:

$$\ddot{u} = \ddot{u}_n + \ddot{u}_g, \quad (37)$$

Entonces el vector de fuerzas de inercia es:

$$\bar{F}_I = [M]\{\ddot{u}_n + \ddot{u}_g\} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 + \ddot{u}_g \\ \ddot{u}_2 + \ddot{u}_g \\ \ddot{u}_3 + \ddot{u}_g \end{Bmatrix}, \quad (38)$$

y el vector de fuerzas en las columnas de la estructura es:

$$\bar{F}_S = [K]\{u\} = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix}, \quad (39)$$

por lo que en equilibrio, y en ausencia de amortiguamiento,

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = 0. \quad (40)$$

Para un sistema con múltiples grados de libertad tenemos (Kramer, 1996):

$$\{u\} = \phi_n \text{sen}(\omega_n t + \theta_n), \quad (41)$$

Donde θ_n es el vector que contiene los ángulos de fase de cada nivel. ω_n es la frecuencia angular de oscilación del n -ésimo nivel y t es tiempo. ϕ_n es el vector amplitud del movimiento armónico del modo n o vector de forma modal.

Al derivar dos veces la ecuación (41) obtenemos que el vector de aceleración es:

$$\{\ddot{u}\} = -\omega_n^2 \phi_n \text{sen}(\omega_n t + \theta_n) = -\omega_n^2 u. \quad (42)$$

Sustituyendo las ecuaciones (41) y (42) en la ecuación (40) obtenemos:

$$-M\omega_n^2\phi_n \text{sen}(\omega_n t + \theta_n) + K\phi_n \text{sen}(\omega_n t + \theta_n) = 0, \quad (43)$$

o bien:

$$K\phi_n - \omega_n^2 M\phi_n = 0. \quad (44)$$

Multiplicando ambos lados de la ecuación por el inverso de la masa tenemos:

$$M^{-1}K\phi_n = \omega_n^2\phi_n \quad (45)$$

El cual es de la forma $Av = \lambda v$, siendo $A = M^{-1}K$, y $\lambda = \omega_n^2$. Al resolver este problema típico de eigenvalores se calculan las formas modales y las frecuencias naturales de vibración del modelo.

La ecuación (45) es la ecuación característica del sistema, la cual, para un sistema de n grados de libertad dará un polinomio de n -ésimo grado. Las n raíces de la ecuación característica $(\omega_1^2, \omega_2^2, \dots, \omega_N^2)$ representan las frecuencias a las que el sistema sin amortiguamiento puede oscilar en ausencia de fuerzas externas. A estas frecuencias se les llama frecuencias circulares naturales del sistema (Kramer, 1996).

Los valores de aceleración del espectro de diseño de Newmark y Hall, correspondientes a cada uno de los periodos naturales de vibración de la estructura, se usan para calcular varios parámetros importantes de la respuesta de la estructura. Entre estos están los factores de participación modal, los desplazamientos máximos, las fuerzas de inercia en cada nivel, la fuerza cortante en la base del edificio (cortante basal) y el momento de volteo. Los factores de participación modal representan las contribuciones al desplazamiento de cada uno de los modos de vibración. El momento de volteo se define como la suma de momentos, con respecto a la base de las fuerzas inerciales. Todos estos parámetros se calculan utilizando las siguientes ecuaciones (Chopra, 2001):

Factores de participación:

$$\Gamma_n = \frac{\{\phi_n\}[M]\{r\}}{\{\phi_n\}[M]\{\phi_n\}^T}. \quad (46)$$

Desplazamientos máximos:

$$u_{n,max} = \phi_n \Gamma_n D_{n,max} \cdot \quad (47)$$

Fuerzas de inercia:

$$F_{s,n} = [M]\{\phi\}\Gamma_n S_{a,n} \cdot \quad (48)$$

Cortante basal:

$$V_{bn,max} = \Gamma_n \sum_{j=1}^N m_j \phi_{jn} A_{n,max} = \frac{(\sum_{j=1}^N m_j \phi_{jn})^2}{\sum_{j=1}^N m_j \phi_{jn}^2} A_{n,max} \cdot \quad (49)$$

Momento de volteo:

$$M_{bn,max} = \frac{\sum_{j=1}^N h_j m_j \phi_{jn}}{\sum_{j=1}^N m_j \phi_{jn}} V_{bn,max} \cdot \quad (50)$$

donde

$D_{n,max}$: representa el desplazamiento calculado a partir del valor de aceleración del espectro de diseño a la frecuencia natural del n -ésimo modo

r : es un vector unitario

$S_{a,n}$: es la aceleración del espectro de diseño a la frecuencia del modo n .

ϕ_{jn} : representa el valor de la matriz de formas modales para el piso j y el modo n .

A partir de las ecuaciones descritas en esta sección (ecuaciones 32 a 45) realizamos un análisis modal del edificio ubicado en Puerto Salina. Este análisis se llevó a cabo para la componente longitudinal, por ser la de los resultados mejor definidos en la función de transferencia (Capítulo 2). En este análisis se utilizaron las masas y rigideces de los entrepisos calculadas por Díaz (2009). La Tabla 6 muestra los valores de las masas y rigideces utilizados en este análisis. Los resultados obtenidos se resumen en las Tablas 7 a 11.

Tabla 6. Masas y rigideces para el edificio de Puerto Salina (Díaz, 2009).

Entrepiso	Rigidez		Masa (Ton)
	Longitudinal (kN/cm)	Transversal (kN/cm)	
1	25833.12	30267.87	1091406.12
2	9721.69	12956.88	123703.788
3	14415.25	10835.41	48060.235
4	7319.63	8201.8	48060.235
5	6219.44	6979.4	48060.235
6	5442.13	6099.95	48060.235
7	4801.77	5379.04	48060.235
8	4956.88	4712.05	48060.235
9	3093.27	4024.83	48060.235
10	2909.8	3254.15	48060.235
11	2103.09	2339.84	48060.235
12	1178.44	1262.4	24233.551

Tabla 7. Frecuencias calculadas de los modos de vibración (componente longitudinal) del edificio en Puerto Salina.

Modo	Frecuencias naturales		Periodo Tn (s)
	ω_n (rad/s)	fn (Hz)	
1	15.963	2.541	0.394
2	37.849	6.024	0.166
3	49.081	7.811	0.128
4	66.02	10.507	0.095
5	82.077	13.063	0.077
6	98.068	15.608	0.064
7	112.635	17.926	0.056
8	133.924	21.315	0.047
9	152.04	24.198	0.041
10	179.713	28.602	0.035
11	202.253	32.19	0.031

En la Figura 66 se muestran las formas de los primeros 4 modos de vibración del edificio; éstas están normalizadas a uno, en el primer nivel. Los valores de cada nivel de estas formas modales se muestran en la Tabla 8.

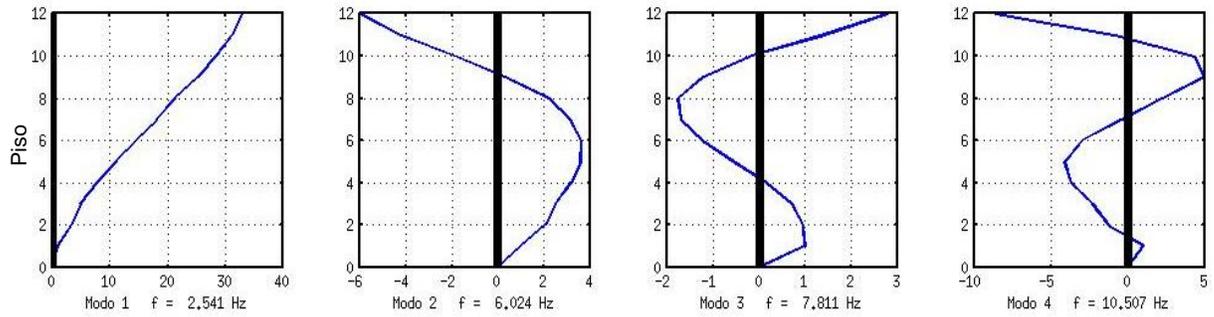


Figura 66. Formas modales de los primeros 4 modos de vibración del edificio.

Tabla 8. Formas modales del edificio de Puerto Salina.

Matriz de formas modales				
Piso	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
1	1	1	1	1
2	3.371	2.049	0.953	-1.236
3	4.897	2.505	0.724	-2.282
4	7.819	3.166	0.159	-3.688
5	11.104	3.595	-0.536	-4.101
6	14.609	3.629	-1.215	-2.994
7	18.208	3.148	-1.693	-0.434
8	21.245	2.245	-1.76	2.23
9	25.27	0.298	-1.209	4.988
10	28.486	-1.843	-0.142	4.329
11	31.276	-4.201	1.412	-0.894
12	33.006	-5.955	2.799	-8.627

Los valores de los desplazamientos de cada entrepiso (calculados con la ecuación 47) se muestran en la Tabla 9. En esta tabla se ve que los desplazamientos producidos por el cuarto modo de vibración son muy pequeños. No se presentan los valores de los modos de vibración del edificio que son superiores al cuarto modo, debido a que éstos son aún más pequeños, lo cual se corrobora con los factores de participación modal mostrados en la Tabla 10.

Tabla 9. Desplazamientos en los pisos.

Piso	Desplazamiento de los pisos (cm)			
	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
1	0.086	0.14	0.158	0.011
2	0.291	0.288	0.151	-0.013
3	0.422	0.352	0.115	-0.025
4	0.674	0.445	0.025	-0.04
5	0.958	0.505	-0.085	-0.044
6	1.26	0.51	-0.192	-0.032
7	1.57	0.442	-0.268	-0.005
8	1.832	0.315	-0.278	0.024
9	2.179	0.042	-0.191	0.054
10	2.457	-0.259	-0.022	0.047
11	2.697	-0.59	0.223	-0.01
12	2.847	-0.836	0.443	-0.093

Tabla 10. Factores de participación modal.

Factores de participación modal	
Modo 1	0.05
Modo 2	0.289
Modo 3	0.548
Modo 4	0.078
Modo 5	0.026
Modo 6	0.006
Modo 7	0.002
Modo 8	0
Modo 9	0
Modo 10	0
Modo 11	0
Modo 12	0

Las fuerzas de Inercia calculadas a partir de las ecuaciones descritas por Chopra (2001), se muestran en las Tablas 11 y 12.

Tabla 11. Fuerzas de inercia en cada piso.

Fuerzas de inercia en los pisos (Newton/1000)				
Piso	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
1	23985	219587	415814	51217
2	9165	50998	44909	-7175
3	5172	24219	13259	-5146
4	8258	30617	2912	-8318
5	11728	34757	-9806	-9249
6	15429	35092	-22256	-6753
7	19231	30440	-30999	-978
8	22439	21706	-32229	5029
9	26690	2879	-22137	11250
10	30087	-17817	-2601	9765
11	33034	-40619	25861	-2017
12	17578	-29034	25841	-9811

Tabla 12. Fuerzas de cortante en la base de cada nivel.

Fuerzas de cortante en los pisos (Newton/1000):				
Piso	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
1	222795	362825	408568	27813
2	198810	143239	-7246	-23404
3	189645	92240	-52155	-16229
4	184474	68022	-65414	-11083
5	176215	37405	-68326	-2765
6	164487	2648	-58520	6484
7	149058	-32445	-36264	13237
8	129827	-62885	-5265	14216
9	107388	-84591	26964	9186
10	80698	-87470	49101	-2064
11	50611	-69653	51702	-11828
12	17578	-29034	25841	-9811

Tabla 13. Momentos de volteo.

Momentos de volteo	
Modo	(Newton-m/1000)
1	5098344
2	1037916
3	820410
4	19055

4.2. Modelo SAP2000

Con el uso del software comercial SAP2000 (desarrollado y comercializado por la compañía *Computers & Structures*) es posible definir el modelo de una estructura. Teniendo este modelo, podemos inducir un movimiento sísmico en la base para obtener las fuerzas cortantes y momentos de torsión en la estructura, así como los desplazamientos de cada uno de los nodos. En la Figura 69 se muestra un modelo proporcionado por Díaz (2009) para el edificio en Puerto Salina. Este modelo es similar a la estructura del edificio y fue utilizado para diseñar el edificio con y sin la consideración de la interacción suelo-estructura. Lo anterior, fue parte de un proyecto de tesis de maestría en ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California.

A partir de este modelo realizamos un análisis modal lineal utilizando el acelerograma del sismo de Morgan Hill, seleccionado en el Capítulo 3, como el movimiento incidente en la base del edificio. Con este análisis se obtuvo la respuesta del edificio y en específico el desplazamiento de la componente longitudinal nodo 19138 (punto de unión entre elementos estructurales). Este nodo corresponde al punto del modelo que representa el lugar en el que se colocaron los sensores en el décimo nivel del edificio (Figura 22). En este nodo el máximo desplazamiento relativo a la base, fue de 6.7 cm. Además, obtuvimos la frecuencia fundamental de vibración y la frecuencia de algunos modos superiores. Las frecuencias del primero y segundo modo de vibración de cada componente se muestran en la Tabla 13.

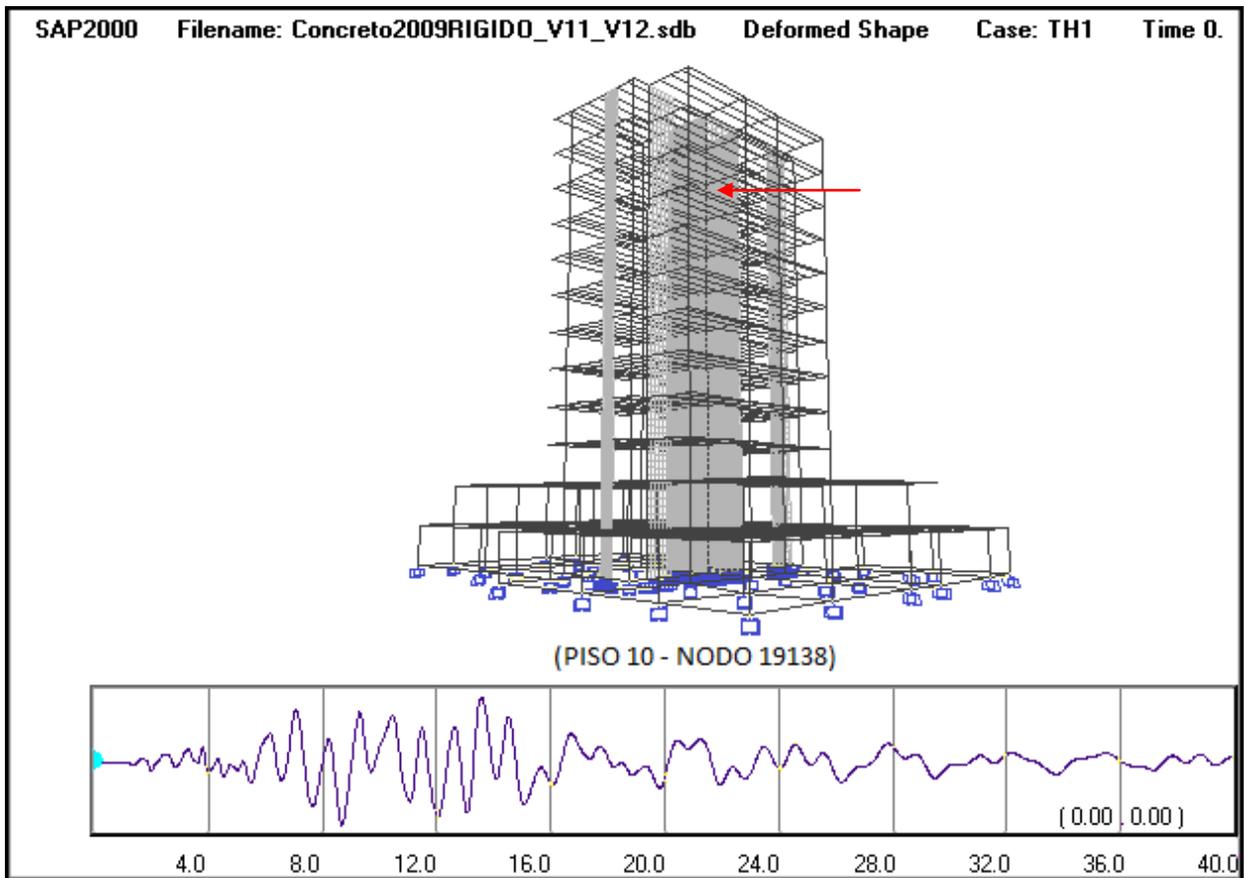


Figura 67. Modelo en SAP2000 del edificio en Puerto Salina. En la parte inferior se muestra la salida (desplazamiento en cm) del nodo 19138. Con una flecha roja se indica la posición de este nodo en la estructura.

Tabla 14. Frecuencias de los modos de vibración del edificio en Puerto Salina obtenidos con SAP2000.

Modo	Componente	Frecuencia (Hz)	Periodo(s)
1	Transversal	2.9013	0.3446
1	Longitudinal	3.0801	0.3246
2	Transversal	8.1209	0.1231
2	Longitudinal	8.5741	0.1166

4.3. Análisis con función de transferencia

Finalmente, en esta sección se obtiene la respuesta del edificio de Puerto Salina en distintos puntos, al propagar por la estructura el sismograma de diseño obtenido en el Capítulo 3. La respuesta estructural se obtiene utilizando las funciones de transferencia, del décimo, sexto y tercer niveles, obtenidas en el Capítulo 2.

Al tener la función de transferencia $H(f)$ para distintos niveles del edificio y un sismograma de diseño determinado a partir del análisis de peligro sísmico, que servirá como entrada $E(f)$, podemos calcular la salida $S(f)$ en los sitios donde se colocaron los sensores. Los pasos que se siguieron para calcular la salida en cada uno de los niveles fueron los siguientes:

- i. Calcular el espectro de Fourier de la componente N-S del registro del sismo de Morgan Hill, considerado como el registro de diseño.
- ii. Multiplicar el espectro de Fourier del registro de diseño, por la función de transferencia del nivel seleccionado.
- iii. Pasar el resultado del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo utilizando la transformada inversa de Fourier.
- iv. Integrar el registro de velocidad, para obtener el registro de desplazamiento.
- v. Restar el desplazamiento de entrada a los desplazamientos de salida, para obtener desplazamientos relativos a la base del edificio.

En este análisis se utilizó como entrada, únicamente la componente N-S del registro del sismo de Morgan Hill. Sin embargo, es posible utilizar ambas componentes o más de un sismo de diseño. Es importante destacar que en un análisis más extenso, también se calcularía la respuesta transversal del edificio. En las Figuras 68, 69 y 70 se muestran respectivamente las salidas de los niveles décimo, sexto y tercero. En estas figuras se muestra la velocidad absoluta, el desplazamiento absoluto, el desplazamiento en la base y el desplazamiento en cada nivel respecto a la base del edificio.

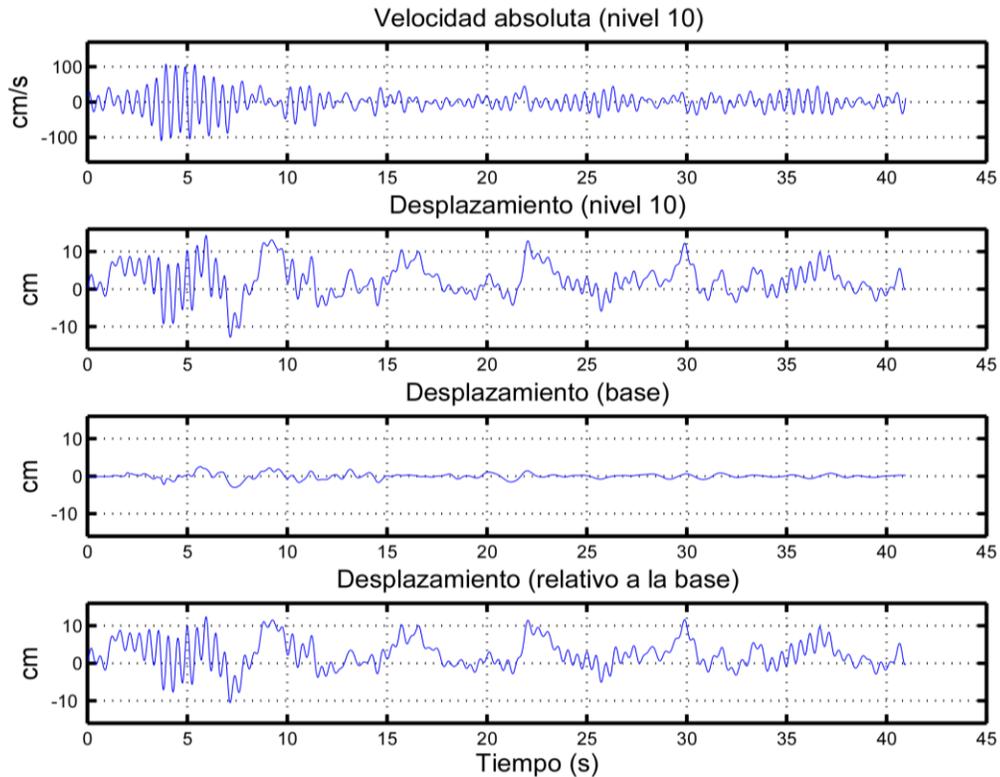


Figura 68. Salida en el décimo nivel, utilizando la función de transferencia calculada en ese nivel. a) Velocidad absoluta, b) desplazamiento absoluto, c) desplazamiento en la base, d) desplazamiento relativo a la base.

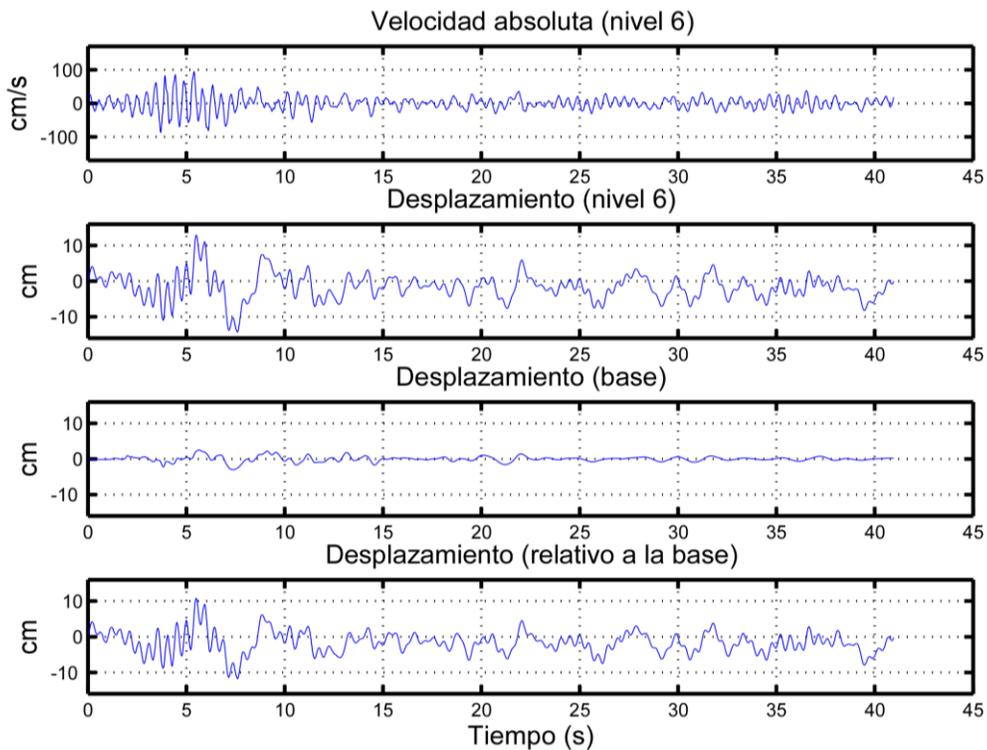


Figura 69. Salida en el sexto nivel, utilizando la función de transferencia calculada en ese nivel. a) Velocidad absoluta, b) desplazamiento absoluto, c) desplazamiento en la base, d) desplazamiento relativo a la base.

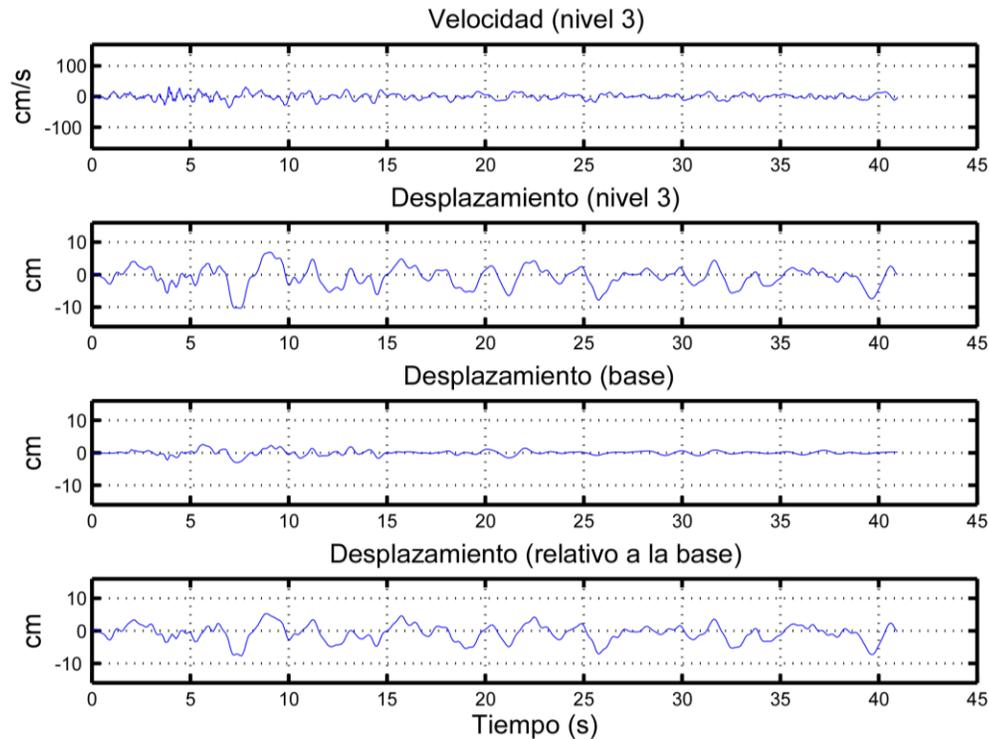


Figura 70. Salida en el tercer nivel utilizando la función de transferencia calculada en ese nivel. a) Velocidad absoluta, b) desplazamiento absoluto, c) desplazamiento en la base, d) desplazamiento relativo a la base.

Los desplazamientos máximos obtenidos utilizando este método fueron: 12.4 cm en el décimo nivel, 11.4 cm en el sexto y 7.6 cm en el tercer nivel.

De una manera resumida, la Tabla 14 presenta una comparación de los resultados obtenidos a partir de los distintos métodos utilizados en este capítulo. La Tabla muestra los periodos fundamentales determinados para el edificio de Puerto Salina, así como los desplazamientos máximos en el décimo nivel del edificio.

Tabla 15. Resumen de resultados obtenidos en el Capítulo 4.

Método	Periodo fundamental de vibración (Hz)	Desplazamiento en el décimo nivel (cm)
Método espectral	2.1	12.4
Sistema con Múltiples Grados de Libertad	2.5	2.4
SAP2000	3.1	7.6

Capítulo 5. Discusión y conclusiones

5.1. Discusión

Estudiamos el peligro sísmico imperante en el norte de Baja California, así como el efecto de los movimientos sísmicos sobre dos estructuras civiles de la región, una ubicada en Tijuana y la otra ubicada en Puerto Salina. En esta sección se discuten primero los resultados del análisis de vibración ambiental, a continuación se discuten los resultados obtenidos mediante el análisis de peligro sísmico y finalmente, los resultados del análisis estructural del edificio.

Vibración ambiental. En resumen, la frecuencia del modo fundamental de vibración del edificio de Puerto Salina se encuentra entre las frecuencias del primero y segundo modos de vibración del suelo. La diferencia entre el modo de torsión y el segundo modo de vibración del suelo es de 0.4 Hz. Sin embargo, si el edificio sufriera algún daño su frecuencia disminuiría alejándose del segundo modo de vibración del suelo. Por otro lado, en la componente longitudinal la frecuencia del modo fundamental se acercaría al primer modo de vibración del suelo.

En cuanto al edificio de Tijuana, se realizó también un análisis espectral con los registros obtenidos. Sin embargo, en este caso solo se utilizaron registros de velocidad, debido a que no se dispuso de acelerógrafos. Para este edificio, la frecuencia fundamental de vibración fue determinada en 5 Hz, mientras que para el suelo fue de 0.6 Hz. En este caso, se utilizó el método de razones espectrales H/V calculadas tanto con los registros obtenidos en campo libre como con los obtenidos en el interior del edificio. En general, resulta más práctico calcular cocientes entre los espectros de registros obtenidos simultáneamente con instrumentos ubicados en distintos sitios o niveles de interés que calcular cocientes espectrales H/V.

Peligro sísmico. En esta parte del estudio, se generaron mapas de peligro sísmico relativos a aceleración horizontal pico y a aceleraciones espectrales a 2 Hz y 5 Hz. Los

mapas fueron generados para una probabilidad de excedencia de 10% (periodo de retorno de 475 años) y un tiempo de exposición de 50 años. Como resultado, los mapas muestran que el mayor peligro sísmico se concentra en la parte noreste de Baja California (Figura 47). Esto se explica por la presencia de los sistemas de fallas Cucapah-Indiviso, Elsinore-Laguna Salada, Imperial y Cerro Prieto, con un alto potencial para producir sismos fuertes que causen daños a la infraestructura regional. Al comparar los mapas de peligro sísmico, observamos que el mapa de aceleración pico y el de aceleración espectral a 2 Hz muestran un contraste significativo entre los ambientes rocoso y sedimentario. El mapa de aceleración espectral a 5 Hz, sin embargo, muestra un efecto menos marcado en el peligro que se observa en estos ambientes. Esto, se debe a que las frecuencias altas son mayormente afectadas por la velocidad promedio de las ondas de corte en los primeros 30 metros de profundidad. En nuestros cálculos, se utilizó una velocidad promedio V_{S30} de 275 m/s con el modelo predictivo de Boore y Atkinson (2008), esto con base en resultados de González y otros (Comunicación personal) obtenidos en varios sitios del Valle de Mexicali. Los valores de aceleración en los mapas de peligro sísmico generados en este estudio concuerdan con los resultados publicados para el sur de California.

Se calcularon también las probabilidades de excedencia de aceleraciones espectrales, para el periodo fundamental de vibración de los edificios estudiados, obteniendo curvas de peligro sísmico para cada caso. Como ejemplo, se calculó que la probabilidad de excedencia de 0.3 g para un periodo de 2 s (periodo fundamental del edificio en Tijuana) y 5% de amortiguamiento, es de 0.58% en 50 años. Se determinó también que la probabilidad de excedencia de 0.3 g para un periodo de 0.5 s (periodo fundamental del edificio en Puerto Salina) y 5% de amortiguamiento, es de 37.32 % en 50 años. Esto no necesariamente significa que exista un mayor peligro en el sitio en Puerto Salina que en el sitio del edificio en Tijuana, ya que las aceleraciones espectrales corresponden a osciladores con periodos de vibración distintos. Si se quiere comparar el peligro sísmico de aceleración espectral en distintos lugares es necesario hacer los cálculos para un mismo periodo de vibración.

Además de calcular las curvas de peligro sísmico, se desagregó el peligro sísmico de aceleración espectral (a los periodos de vibración de los edificios) para ambos sitios.

Como se describió anteriormente, el mayor peligro sísmico en los sitios de los edificios de Puerto Salina y Tijuana se debe a la presencia de la falla Vallecitos. Aun habiendo fallas más cercanas a estos sitios, como las fallas La Nación o la falla Coronado Banks, la mayor contribución al peligro lo originan las fallas que producen sismos con magnitudes mayores o iguales a 6.0. Históricamente, el sismo más fuerte producido por la falla Vallecitos es de 5.7. Sin embargo, en su estudio de sismos pasados y posibles sismos futuros en la región de estudio, Anderson et al., (1989) sugieren que esta falla pudiera dar lugar a un sismo de magnitud 7. Esta posibilidad de ocurrencia es alta, si consideramos que el segmento central del sistema Vallecitos-San Miguel fue responsable de una serie de sismos de magnitudes entre 6 y 6.8 en los años 1954 y 1956 (Shor y Ellis, 1958). Para los dos sitios de nuestro interés, la contribución al peligro de fallas ubicadas a distancias mayores que 70 km es insignificante o nulo.

A partir de las estimaciones de peligro, se obtuvo un espectro de respuesta de peligro sísmico uniforme para el sitio en Puerto Salina. Este espectro tiene su valor máximo (0.63 g) a un periodo de 0.2 s, lo cual es aproximadamente 1.5 veces el definido por las normas técnicas complementarias de BC para el tipo de suelo en ese sitio. Utilizando el espectro de peligro uniforme, se seleccionaron seis registros que cuentan con características especiales, según lo determinado en el análisis de desagregado de peligro sísmico. Las características especiales que deben satisfacer estos registros son: haber sido producidos por sismos de magnitudes entre 6 y 7, haberse registrado en sedimentos superficiales y a distancias epicentrales de entre 30 y 35 km y tener aceleraciones máximas similares a las esperadas en los sitios en evaluación. Estos registros fueron seleccionados del catálogo del *Center for Engineering Strong Motion Data (del Servicio Geológico de Estados Unidos)*. Las características del registro buscado son tales que su espectro de respuesta tiene que ser lo más parecido al espectro de peligro uniforme resultante del PSHA. El espectro de respuesta del acelerograma registrado en la estación 24283 para el sismo de Morgan Hill (1984, M_w 6.2) fue el que presentó un menor residual respecto al espectro de peligro uniforme. Este espectro en su valor máximo, es mayor al doble del espectro de diseño definido de las normas técnicas de BC. El valor máximo de la amplitud en los otros 5 espectros de respuesta obtenidos a partir de los registros seleccionados, también es mayor al doble de la amplitud del espectro de diseño descrito en las Normas Técnicas

Complementarias de BC. Esto sugiere que las amplitudes del espectro de respuesta del sismo de Morgan Hill son comunes para un sismo con una magnitud de entre 6 y 7 y a una distancia de entre 30 y 35 km (características obtenidas a partir del desagregado de peligro sísmico). Por lo anterior, el sismograma del sismo de Morgan Hill y el espectro de diseño calculado según Newmark y Hall (1982) fueron utilizados en el análisis de la respuesta estructural del edificio en Puerto Salina.

Respuesta del edificio de Puerto Salina. La respuesta del edificio ubicado en Puerto Salina se analizó de tres diferentes maneras. Primero se analizó la respuesta de la estructura modelando el edificio como un sistema con múltiples grados de libertad (SMGDL). Después se examinó usando el registro de diseño y las características estructurales del edificio, definidas por Díaz (2009), en combinación con el programa SAP2000. En este caso se obtuvo la respuesta teórica del edificio con base en los movimientos aplicados en su base. Finalmente se utilizó la función de transferencia del edificio para determinar los desplazamientos de los entrepisos a varios niveles. Las frecuencias fundamentales de vibración del edificio obtenidas con los métodos SMGDL, SAP2000 y la función de transferencia, fueron respectivamente 2.5 Hz, 3 Hz y 2.1 Hz, mientras que los desplazamientos en el décimo nivel del edificio fueron 2.8, 7.6 y 12.4 cm.

Pese a que tanto el método de sistema con múltiples grados de libertad como el modelo en SAP2000 utilizaron los mismos datos de masa y rigidez, descritos por Díaz (2009), los desplazamientos obtenidos con el primer método son notoriamente menores. Esto probablemente se deba a que al modelar el edificio como un oscilador armónico con varios grados de libertad no se tomó en cuenta la rotación del edificio, efecto que fue muy notorio en el análisis de vibración ambiental, realizado en el Capítulo 2. Además, los desplazamientos estimados con el primer método de análisis podrían ser menores debido a que en ese caso solo se consideraron algunos valores de la amplitud del espectro de Newmark y Hall. Se debe considerar aquí que el espectro de diseño es una versión suavizada de un espectro de respuesta altamente irregular que se calcula del registro de diseño. Usando la versión suavizada del espectro de diseño se trata de tomar en cuenta la incertidumbre que existe en cuanto a las propiedades del suelo y de la estructura, evitando, de ese modo, la alta variabilidad en las aceleraciones con

pequeños cambios en el periodo de la estructura. Adicionalmente, el análisis con SAP2000 considera el acelerograma completo y no solo algunos valores del espectro de diseño, como se hizo en la primera forma de análisis. Finalmente, si al modelado con SAP2000 se le restringe la componente de rotación, es posible que los desplazamientos resultantes sean considerablemente menores, y más semejantes a los obtenidos con el primer análisis.

Los desplazamientos estimados en el décimo nivel mediante el uso de la función de transferencia fueron mayores a los obtenidos con los primeros dos métodos. Es probable que esto sea debido a las suposiciones que se hicieron en esos modelados, tanto en las masas como en las rigideces. Por lo general los estudios de vibración ambiental se utilizan para calibrar modelos teóricos, por lo cual resultaría interesante calibrar el modelo en SAP2000 utilizando el periodo fundamental de vibración obtenido en el Capítulo 2.

5.2 Conclusiones

Las conclusiones principales de este trabajo son las siguientes:

- El análisis espectral realizado a partir de registros de vibración ambiental en velocidad fue apropiado para identificar las frecuencias fundamentales de vibración de los edificios estudiados y las del suelo adyacente a los edificios.
- El periodo fundamental del primer modo de vibración del edificio de Tijuana, obtenido a partir de registros de vibración ambiental, fue similar al obtenido a partir de los datos registrados en campo libre y en tres niveles del edificio de un sismo de magnitud 6.1 ocurrido a ~ 1260 km del sitio.
- Los periodos fundamentales de resonancia del suelo y del edificio ubicado en Tijuana son distintos (4.4 Hz de diferencia), por lo que se descarta un posible acoplamiento de sus modos de vibración durante la ocurrencia de sismos regionales. Los periodos de vibración tanto del edificio en Puerto Salina, como del suelo adyacente no son muy diferentes entre sí (1.0 Hz de diferencia).

- Los resultados del análisis de peligro sísmico en la región norte de Baja California muestran que el mayor peligro sísmico se concentra en la parte noreste de la región. En los sitios en evaluación, las aceleraciones máximas esperadas son del orden de 0.3 g, con probabilidad de excedencia de 10% en 50 años.
- Mediante un proceso de desagregado de peligro sísmico, se identificó a la falla Vallecitos como aquella que plantea el mayor peligro sísmico en los sitios de los edificios de Tijuana y Puerto Salina.
- A partir de lo desarrollado en este trabajo, es posible obtener espectros de aceleración de peligro sísmico uniforme para sitios de interés y tomarlos como base para seleccionar acelerogramas con características adecuadas para ser utilizados como aceleraciones de diseño. Estas señales de diseño son utilizadas en estudios de la respuesta dinámica de estructuras de importancia social o económica.
- El programa EPS14 es una herramienta útil en el análisis de peligro sísmico, tanto para elaborar mapas de peligro sísmico, como para desagregar el peligro sísmico en algún sitio específico y calcular espectros de peligro uniforme.

5.3 Recomendaciones

- Realizar análisis de vibración ambiental (o mediciones permanentes) en edificios de importancia económica o social en las ciudades de Mexicali, Tijuana y Ensenada, con el propósito de verificar sus propiedades dinámicas.
- Para mejorar los mapas de peligro sísmico elaborados en este trabajo, se recomienda asociar la geología superficial a los mapas de peligro sísmico, o de ser posible realizar una campaña de mediciones de V_{S30} en la región norte de Baja California.
- Calcular espectros de peligro uniforme para distintas áreas de las ciudades de Tijuana, Ensenada y Mexicali, los cuales puedan ser utilizados por Ingenieros Estructuristas.
- Es necesario calibrar el modelo en SAP2000 con el periodo obtenido en el análisis de vibración ambiental para obtener resultados similares a los obtenidos con las mediciones de vibración ambiental.

- Al modelar un edificio como un oscilador con múltiples grados de libertad, es importante considerar el efecto de torsión de la estructura.

Lista de referencias bibliográficas

- Acosta-Chang, J. G., Arellano-Zepeda, G. A., Ruiz-Cruz, E., Mendoza-Garcilazo, L. H., Reyes-Serrano, L., y Rocha-Guerrero, E. (2009). *Microzonificación sísmica en la zona urbana de Tijuana B.C.* Tijuana: Protección civil. Gobierno del estado de Baja California, CICESE, DEPC, FOPREDEN. 115 p.
- Anderson, J. G., Róckwell, T. K., y Agnew, D. C. (1989). Past and possible future earthquakes of significance to the San Diego region. *Earthquake Spectra*, 5 (2), 299-335.
- ANSI S2.47-1990. *Vibration of buidings-guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings.* New York: Standars Secretariat.
- Astiz, L., y Shearer, P. M. (2000). Eartquake locations in the inner continental borderland, offshore southern California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90 (2), 425-449.
- Bazan, E., y Meli, R. (2004). *Diseño sísmico de edificios.* Distrito Federal: Limusa.
- Bendat, J. S., y Piersol, A. G. (1971). *Random Data: Analysis and Measurement Procedures.* New York: John Wiley & Sons.
- Biot, M. A. (1932). *Transient oscillations in elastic systems. General theorems. Vibrations of buildings during earthquake. Critical torsional vibrations of accelerated rotating shafts. Dissertation (Ph.D.).* California Institute of Technology.
- Boore, D. M., y Ambraseys, N. N. (1993). Some notes concerning prediction of ground motions for GSHAP. *Annali di geofisica* , 169-180.
- Boore, D. M., y Atkinson, G. M. (2008). Ground-Motion Prediction Equations for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, and 5%-Damped PSA at Spectral Periods between 0.01 s and 10.0 s. *Earthquake Spectra*, 24 (1), 99–138.
- Borcherdt, R. D. (1970). Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 60, 29-61.
- Chopra, A. K. (1995). *Dynamics of structures, theory and applications to earthquake enineering.* Englewood Cliffs, California: Prentice Hall.
- Cornell, C. A. (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58 (5), 11583-1606.
- Cruz-Catillo, M. (Abril de 2002). Catálogo de las fallas regionales activas en el norte de Baja California, México. *GEOS, Union Geofisica Mexicana,A.C.* , 37-42.
- De Barcia, A. (2003). Determinación de períodos predominantes en edificaciones de. *Revista Ciencia e Ingeniería*, 24 (1), 25-29.

- Díaz-Guzmán, F. D. (2009). *Efecto de Interacción Dinámica Suelo-Estructura en el Análisis Sísmico de un Edificio en Ensenada*. Ensenada B.C. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Baja California.
- Espinoza-Barreeras, F. (1999). *Determinación de características dinámicas de estructuras*. Cataluña, España. Tesis de Doctorado. Universidad politécnica de Cataluña.
- Fadil, H. (1969). *General Applied Statistics*. Northridge: Addison-Wesley.
- Field, E. H., Dawson, T. E., Flezer, A. D., Frankel, A. D., Gupta, V., Jordan, T. H., y otros. (2009). Uniform California Earthquake Rupture Forecast, Version 2 (UCERF 2). *Bulletin of the Seismological Society of America*. 99 (4), 2053-2107.
- Frez-Cárdenas, J. D., y Frías-Camacho, V. M. (1998). Mapas anuales de sismicidad para la region fronteriza de ambas californias. *GEOS Union Geofisica Mexicana, A.C.*, 18 (2), 112-130.
- Frez-Cárdenas, J. D., y González-García, J. J. (1991). Crustal Structure and Seismotectonics of Northern Baja California. (J. P. Simoneit, Ed.). *The Gulf and Peninsular Province of the Californias*, 47, 261-283.
- Gastil, R. G., Phillips, R. P., y Allison, E. C. (1975). Reconnaissance geology of the state of Baja California. *Geological Society of America Memoirs*, 140, 1-201.
- Grant, L. B., y Shearer, P. M. (2004). Activity of the Offshore Newport–Inglewood Rose Canyon Fault Zone., *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94 (2), 747-752.
- Gutenberg, B., y Richter, C. F. (1956). Magnitude and energy of earthquakes. *Annals of Geophysics*, 9(1), 1-15.
- Hatch, M. E. (1987). *Nanotectonics of the agua blanca fault, Valle Agua Blanca, Baja California, Mexico*. Tesis de Maestría. Faculty of San Diego University.
- Henao-Ángel, D. (2013). Identificación de las propiedades dinamicas de una estructura sometida a vibración empleando analisis espectral. Tesis de maestría, *Universidad EAFIT*.
- Hirabayashi, C. K., Rockwell, T. K., Wesnousky, M. W., Stirling, M. W., y Suarez Vidal, F. (1996). A Neotectonic Study of the San Miguel-Vallecitos Fault, Baja California, Mexico. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86 (6), 1770-1783.
- Huerta-Lopez, C. I., Lomelí-Limón, D. S., Esparza-Fuentes, M., Espinoza-Barreras, F., Contreras-Porras, R. S., y Baltazar-Cifuentes, Y. (2009). Frecuencias de vibración, teóricas y experimentales de un edificio de nueve niveles localizado en la vecindad de la zona río de Tijuana, BC, México. *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 9(1-2), 97-114.

- Ibarra-Torua, G. K. (2004). *Microzonación de periodos dominantes en los principales centros urbanos de Baja California*. Ensenada, Baja California, Mexico. *Tesis de Maestría en Ciencias de la Tierra*. CICESE.
- Kalkan, E., Wills, C. J., y Branum, D. M. (2010). Seismic Hazard Mapping of California Considering Site Effects. *Earthquake Spectra*, 26 (4), 1039-1055.
- Kanasewich, E. R. (1981). *Time Series Analysis in Geophysics* (3a. ed.). Edmonton, Alberta, Canadá: University of Alberta Press.
- Klein, F. W., Frankel, A. D., Mueller, C. S., Wesson, R. L., y Okubo, P. G. (2001). Seismic hazard in Hawaii: High rate of large earthquakes and probabilistic ground-motion maps. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91(3), 479-498.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Nueva Jersey: Prentice-Hall, Inc.
- Lermo, J., y Chavez Garcia, F. J. (1993). Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. *Bulletin Seismological Society of America*, 83(5), 1574–1594.
- Morales-Esteban, A., deJusto, J. L., Martínez-Álvarez, F., y Azañón, J. M. (2012). Probabilistic method to select calculation accelerogram sbased on uniform seismic hazard acceleration response spectra. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* , 174–185.
- Moran, J. (2016). *Calibracion de sismógrafos con el uso de una mesa vibratoria*. Ensenada B.C. Tesis de Licenciatura. Instituto Tecnológico de Ensenada.
- Muller, K. J., y Thomas, K. R. (1995). Late quaternary activity of the Laguna Salada fault in northern Baja California, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 106 (1), 8-18.
- Munguía L., (2014). *Results of a Preliminary Earthquake Hazard Study in North Baja California, México*. SSA Annual Meeting. Anchorage, Alaska, USA. April 30 a May 2, 2014.
- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. Railway Technical Research Institute, *Quarterly Reports*, 30(1).
- Newmark, N. M., & Hall, W. J. (1982). *Engineering Monographs on Earthquake Criteria, Structural Design, and Strong Motion Records*. Earthquake Spectra and Design, 3.
- Oppenheim, A. V., y Schafer, R. W. (1975). *Digital Signal Processing*, Prentice Hall, Englewood Cliffs. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall.
- Ortiz Huerta, L. G. (2010). *Identificación de cambios en el comportamiento estructural de un edificio experimental, mediante el análisis de vibración ambiental y vibración forzada, empleando tecnicas de identificación de sistemas*. Ensenada. Tesis de Maestría Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada.

- Ramírez-Ramos, E. E., y Vidal-Villegas, J. A. (2016). *Manual de mesa de calibración de instrumentación sísmica: ER-CT1*. Ensenada B.C. disponible en: https://www.researchgate.net/publication/290275826_Manual_de_Mesa_de_Calibracion_de_Instrumentacion_Sismica_ER-CT1
- Rockwell, T. K., y Lindvall, S. (1990). Holocene activity of the Rose Canyon fault in San Diego, California, based on trench exposures and tectonic geomorphology (abstracts with programs). *Geological Society of America Bulletin*, 22 (3), 78.
- Rockwell, T. K., Hatch, M. E., y Schug, D. L. (1987). Late Quaternary rates, Agua Blanca and borderland faults. *US Geological Survey final technical report, contract no. 14-08-0001, 22012*, 65.
- Rockwell, T. K., Schug, D. L., y Hatch, M. E. (1993). Late Quaternary slip rates along the Agua Blanca fault, Baja California, Mexico, in Geological Investigations of Baja California,. *South Coast Geological Society, Annual Field Trip Guidebook* (21), 53-92.
- Secretaría de infraestructura y desarrollo urbano del estado de BC. (2013). *Normas técnicas complementarias estructurales de la ley de edificaciones del estado de baja california en materia de diseño sísmico, criterios y acciones de diseño estructural, diseño y construcción de cimentaciones y diseño de estructuras de mampostería*. Periodico Oficial del Estado de Baja California, Tomo CXX, No. 58.
- SESAME. (2004). Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations: measurements, processing and interpretation, <http://sesamefp5.obs.ujfgrenoble.fr/Delivrables/Del-D23>.
- Shor, G. G., y Roberts E. (1958). San Miguel, Baja California Norte, earthquakes of February, 1956. *A field report. Bulletin of the Seismological Society of America*, 48(2), 101-116.
- Stein, R. S., y Hanks, T. C. (1998). $M \geq 6$ earthquakes in southern California during the twentieth century: No evidence for a seismicity or moment deficit. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88 (3), 635-652.
- Suárez Vidal, F. (1999). Sismos de $M > 6$ en el valle de Mexicali, generación y distribución de estructuras aisladas a licuefacción. *GEOS Union Geofísica Mexicana*, 19 (1), 15-23.
- Wesnousky, S. G. (1990). Seismicity as a function of cumulative geologic offset: some observations from southern California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 80 (5), 1374-1381.
- Wesnousky, S. G. (1994). The Gutenberg-Richter or characteristic earthquake distribution, which is it? *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84 (6), 1940-1959.
- Wong-Ortega, V., Legg, M., y Suarez Vidal, F. (1987). Sismicidad y tectónica de la margen continental del Sur de California (USA) y Baja California Norte (Mexico). *Geofísica Internacional*, 26(3), 459-478.

Apéndice I

En este anexo se presentan las gráficas de respuesta de los equipos utilizados.

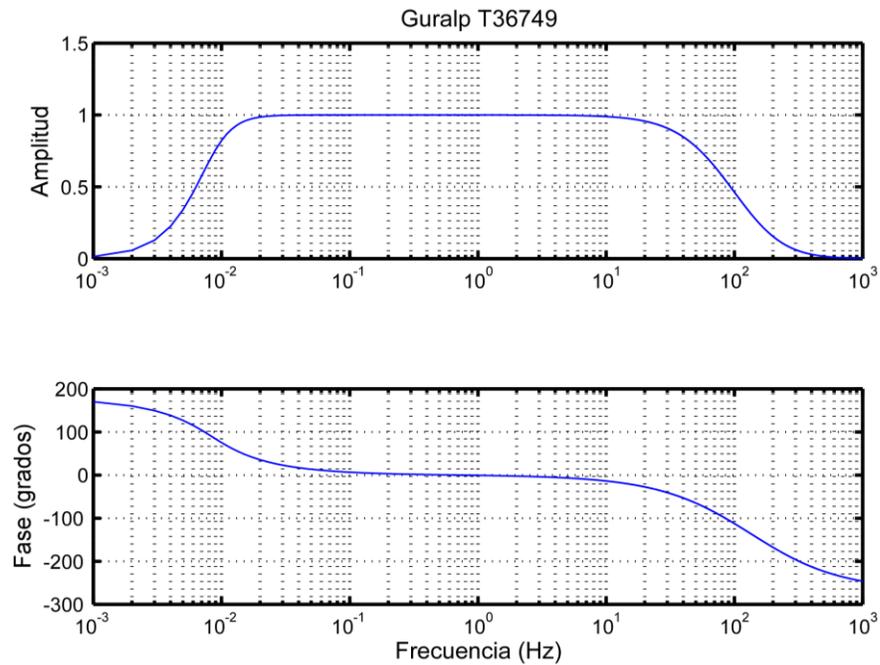


Figura 71. Respuesta en amplitud y fase de las tres componentes del sismómetro Guralp 36749.

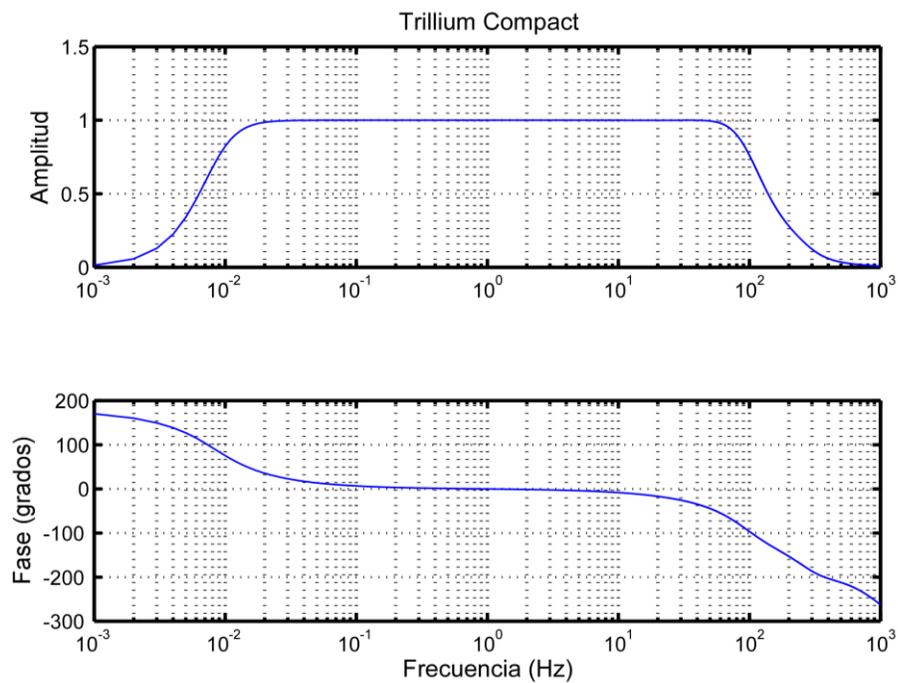


Figura 72. Respuesta en amplitud y fase de las tres componentes del sismómetro Trillium Compact.

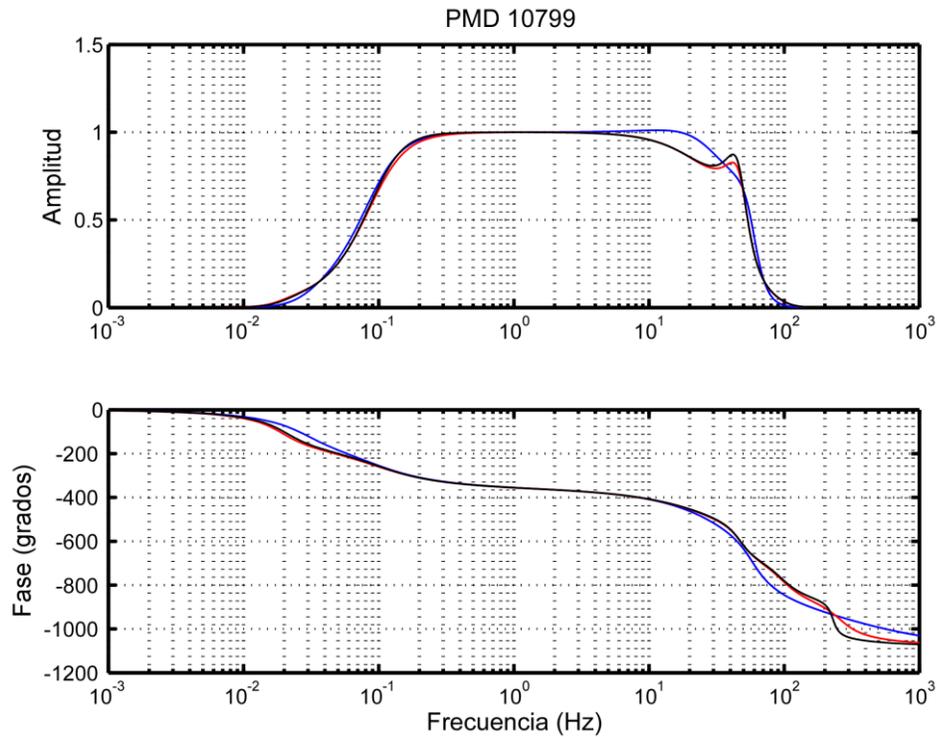


Figura 73. Respuesta en amplitud y fase de las tres componentes del sismómetro PMD. Las líneas, azul, roja y negra corresponden respectivamente a las componentes vertical, longitudinal y transversal.

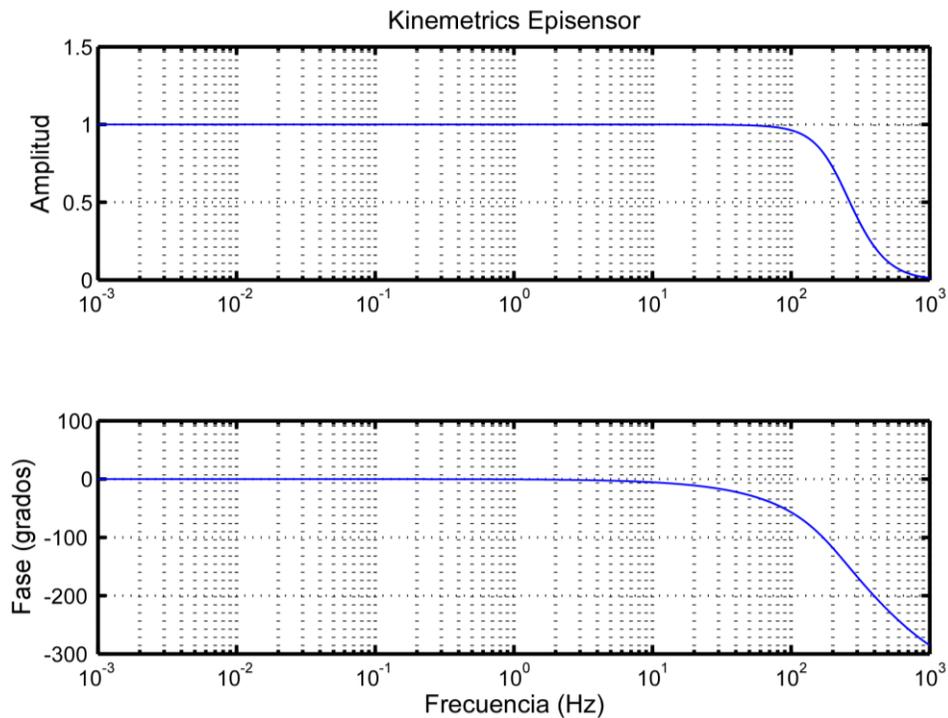


Figura 74. Respuesta en amplitud y fase de las tres componentes del acelerómetro Episensor ES-T.

Apéndice II

Utilizando la mesa de Calibración ER-CT1 (Figura 75), diseñada por Ramírez (2015), se probó uno de los acelerómetros EST-1 utilizados en la medición de vibración ambiental en el edificio de La Salina. Lo anterior, con el propósito de verificar que éste registrara correctamente los desplazamientos a 1Hz. Las pruebas consistieron en desplazar el sensor 2.0 cm, 0.1 mm y 0.01 mm hacia arriba y hacia abajo a una frecuencia de aproximadamente 1 Hz y después calcular la Transformada de Fourier de los desplazamientos registrados. En la amplitud de la transformada de Fourier se pudo identificar el pico correspondiente a 1 Hz (Figura 76). También, se calcularon las curvas de respuesta en amplitud y fase de uno de los sensores utilizados en las mediciones de vibración ambiental en Puerto Salina, Moran (2016). Estas curvas, obtenidas utilizando la mesa de calibración ER-CT1, son similares a las proporcionadas por el fabricante. En ellas podemos notar que el ancho de banda del sensor es apropiado para la medición de las señales de interés en este trabajo. La sensibilidad del sensor también es apropiada de acuerdo a las especificaciones del fabricante.

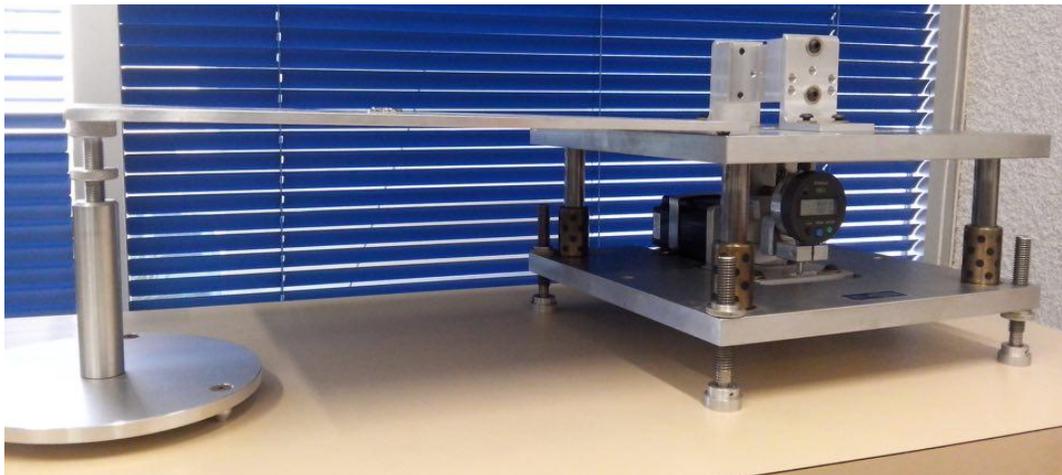


Figura 75. Mesa de calibración ER-CT1 usada para la calibración del acelerómetro EST-1.

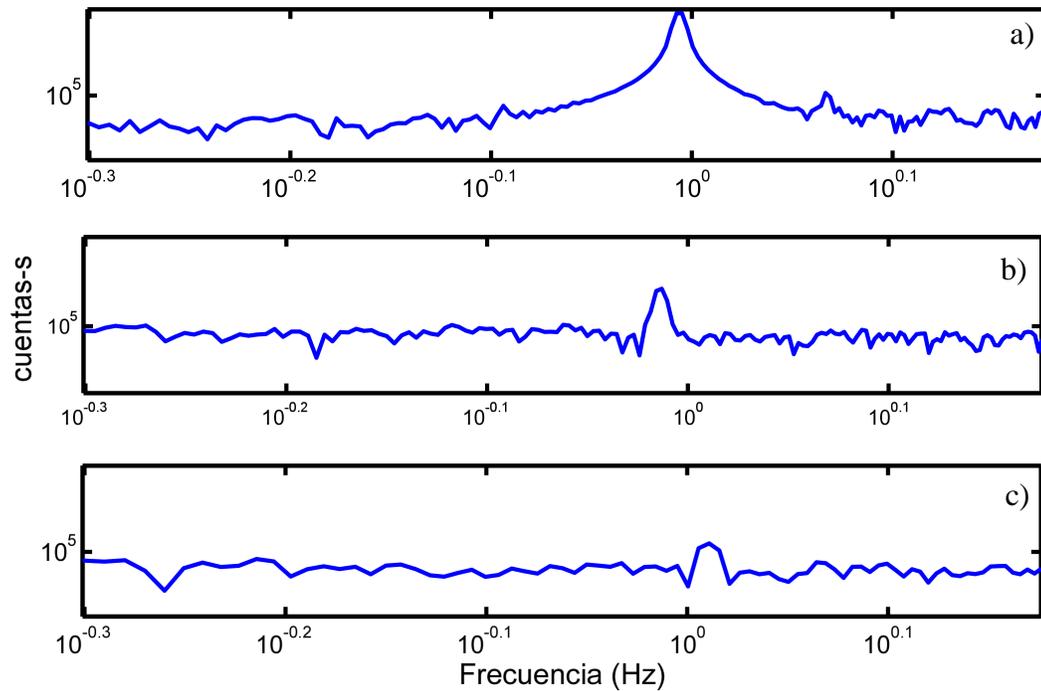


Figura 76. Espectros de Fourier de la prueba realizada a uno de los sensores Episensor. a) desplazamiento de 2 cm, b) desplazamiento de 0.1mm c) desplazamiento de 0.01mm.

En las gráficas podemos notar que conforme el desplazamiento vertical inducido al acelerógrafo disminuye, el pico que define la frecuencia a la cual se estaba desplazando el sensor disminuye. Esto sugiere que para desplazamientos menores, la frecuencia podría confundirse con la vibración ambiental si los valores de ésta son altos.

Es necesario realizar más pruebas para determinar la razón por la cual no se pudo identificar la frecuencia fundamental del edificio de la Salina con los registros de aceleración.

Apéndice III

La Tabla 16 de este Anexo contiene los resultados de la investigación bibliográfica, utilizada en la sección 3.3, para la identificación de la magnitud máxima en cada falla o segmento de falla.

Tabla 16. Algunos parámetros de fallas o segmentos de fallas (longitud, profundidad, desplazamiento relativo, a y b de la ley de Gutenberg-Richter, magnitud máxima) obtenidos a partir de una revisión bibliográfica.

No.	Falla	L (km)	H (km)	DR (mm/año)	a	b	$M_{\text{máx}}$	Referencias
1	Imperial	45.8,65	13.2	20			7	8
2	Imperial			47			7.1	11
3	Imperial						7.1	13
4	Imperial (1940)	55	10	30-45			6.8	17
5	Imperial (1979)	40	10	30-45			6.6	17
6	Cerro Prieto			45			7.1	5
7	Cerro Prieto						7.1	11,13,14,15
8	Cerro Prieto (1934)	100	10	40-45			7.2	17
9	Cerro Prieto (repeat 1980)	26	10	40-45			6.4	17
10	Laguna Salada-Cucapah-Indiviso	76	13.3	3.7			7.2	8
11	Laguna Salada						6.5	15
12	San Miguel	160	15	0.2- 0.35	4.65	1.11	6.8,5.7	2, 5
13	San Miguel						6.8	12,15, 17
14	San Miguel			0.1-3			6.8	11
15	San Miguel-Vallcitos (sur1956)	49	12	0.5-2			6.8	17
16	San Miguel-Vallcitos (central)	55	12	0.5-12			6.9	17
17	San Miguel-Vallcitos (Norte)	75	12	0.5-12			7-7.5	17
18	Vallecitos						5.7	12
19	Agua Blanca			4-6				3, 5
20	Agua Blanca			4			6	11
21	Agua Blanca			6				17
22	Agua Blanca - Coronado B. (Valle de trinidad)	65	12	4-6			7	17
23	Agua Blanca - Coronado B. (Santo Tomas)	35	12	4-6			6.5	17
24	Agua Blanca - Coronado B. (Punta Banda)	29	12	4-5			6.5	17
25	Agua Blanca - Coronado B.	>250	12	2-6			7.7	17
26	Agua Blanca - Coronado B.	>85	12	2-6			7.1	17
27	Agua Blanca - Coronado B.	>15	12	2-6			6.1	17
28	Coronado Bank						7.1	5
29	Ranch Elmore – Fallas Supertition Hills			4			6.6	8
30	Elsinore	180	12	5		1	7	5
31	Elsinore					1.22		9
32	Elsinore						7-7.5	11

33	Elsinore (Sur de California)	260		5-6		-6	17
34	Elsinore (Temescal Valley)	15-20	20			6.5	17
35	Elsinore (Coyote Mountains)					7	17
36	Elsinore - Laguna S. (Sierra Mayor)	49	10	1-2		7.2	17
37	Elsinore - Laguna S. (Chupamieros 1934)	22	10	1-2		6.7	17
38	Elsinore - Laguna S. (Laguna Salada 1899)	38	10	1-2		7	17
39	Elsinore - Laguna S. (Coyote Mtn.)	60	10	4-10		7	17
40	Elsinore - Laguna S. (Julian)	80	12	3-7		7.1	17
41	Elsinore - Laguna S. (Temecula)	50	12	3-7		6.8	17
42	Elsinore - Laguna S. (1)	130	12	3-7		7.4	17
43	Elsinore - Laguna S. (Glen Ivy)	22	10	3-7		6.3	17
43	Elsinore - Laguna S. (Wittier-Chino)	75	12	3-7		7	17
45	Elsinore - Laguna S. (2)	95	12	3-7		7.2	17
46	Laguna Salada			2-3		7-7.5	1
47	San Jacinto	200		12		6.6	5
48	San Jacinto			15			7
49	San Jacinto					0.92	9
50	San Jacinto (1)	26	10	8-15		6.4	17
51	San Jacinto (2)	26	10	8-15		6.4	17
52	San Jacinto(1968)	35	10	2.8-5		6.5	17
53	San Jacinto (Coyote Mtn.)	14	10	2.8-5		6.3	17
54	San Jacinto (3)	60	10	2.8-5		6.9	17
55	San Jacinto (4)	110	10	2.8-5		7.2	17
56	San Jacinto(1954)	17	10	6-10		6.1	17
57	San Jacinto(Clarck Valley)	42	12	6-10		6.7	17
58	San Jacinto(Anza)	35	12	8-15		6.6	17
59	San Jacinto(1899)	29	12	4-8		6.5	17
60	San Jacinto (5)	75	12	8-15		7	17
61	San Jacinto (6)	120	12	8-15		7.3	17
62	San Jacinto(1918)	55	12	4-12		6.2	17
63	San Jacinto(1923)	30	12	8-15		6.5	17
64	San Jacinto (7)	85	12	4-8		7.1	17
65	Coyote Creek			4		7	7
66	San Andres segmento Coachelas	95		22		7.2	5
67	San Andres			20			7
68	San Andres					0.85	9
69	Rose Canyon			1.5		6.7	4, 5,8
70	Rose Canyon			1			11
71	Rose Canyon					6.9	5
72	Rose Canyon Newport - Inglewood (1)	50	12	0.5-3		6.8	17
73	Rose C. Newport - Inglewood (2)	18	12	0.5-3		6.2	17
74	Rose C. Newport - Inglewood (Mission Bay)	24	12	0.5-3		6.4	17
75	Rose C. Newport - Inglewood (La Nacion)	28	12	.02-.08		6.5	17
76	Rose C. Newport - Inglewood (del Mar)	34	12	0.5-3		6.6	17
77	Rose C. Newport - Inglewood (3)	60	12	0.5-3		6.9	17
78	Rose C. Newport - Inglewood (Pendleton)	70	12	0.5-3		7	17
79	Rose C. Newport - Inglewood (1933)	37	12	0.5-3		6.6	17

80	Newpot-Inglewood				6.3	16
81	Maximinos				5.6	16
82	San diego				5.3	11
83	San Diego (1)			1		17
84	San Diego (2)	>250	12	0.05-1	7.7	17
85	San Diego (3)	>85	12	0.05-1	7.1	17
86	San Diego (4)	>15	12	0.05-1	6.1	17
87	San Clemente				5.9	12,16
88	San Clemente			4		17
89	San Clemente - San Isidro (1)	>250		0.5-5	7.7	17
90	San Clemente - San Isidro (2)	>200		0.5-5	7.6	17
91	San Clemente - San Isidro (3)	>35		0.5-5	6.6	17
92	San Isidro				5	11
93	Santa Cruz-Falla Santa Catalina				5.3	16
94	Santa BarbaraChanel				5.3	16
95	San Andres (Indio)	130	10	30	7.3	17
96	San Andres(Palmdale)	175	12	20-35	7.5	17
97	San Andres (1)	305	12	20-35	7.9	17
98	San Andres(1857)	380	12	25-35	8	17
99	San Andres (2)	580	2	25-35	8.2	17
100	Sierra Juarez					17

a y b son las variables que describen la recta de la ecuación de recurrencia sísmica de Gutenberg y Richter

M_{max} es la magnitud máxima esperada para cada una de las fuentes sísmicas, considerada en este trabajo.

L y H son la longitud y profundidad del plano de falla.

DR es el desplazamiento relativo de la falla.

Los paréntesis corresponden a distintos segmentos de la falla.

Los números de referencia corresponden a:

- | | |
|---------------------------------------|--|
| 1. (Muler and Tomas, 1995) | 10. (Wesnowsky, 1994) |
| 2. (Hirabayashi <i>et al.</i> , 1996) | 11. (Cruz-Castillo, 2002) |
| 3. (Rockwell <i>et al.</i> , 1993) | 12. (Wong-Ortega and Suarez-Vidal, 1987) |
| 4. (Rockwell <i>et al.</i> , 1990) | 13. (Suarez-Vidal, 1999) |
| 5. (Grant and Rockwell, 2002). | 14. (Frez and Frias-Camacho, 1998) |
| 6. (Rockwellet <i>et al.</i> , 1987) | 15. (Frez and Gonzalez 1998) |
| 7. (Field <i>et al.</i> , 2009). | 16. (Astiz and Shearer, 2000) |
| 8. Open-File Report 2008-1128, USGS. | 17. (Anderson <i>et al.</i> , 1989) |
| 9. (Wesnousky, 1990) | |