

01161  
2



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA  
FACULTAD DE INGENIERIA

" ACELEROGRAMAS EN LA CIUDAD DE MÉXICO  
ANTE SISMOS FUTUROS "

**T E S I S**  
PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN INGENIERIA  
(ESTRUCTURAS)

**PRESENTA**  
**CESAR AUGUSTO ARREDONDO VÉLEZ**

DIRECTOR: DR. EDUARDO REINOSO ANGULO

CIUDAD UNIVERSITARIA, JUNIO 2003



TESIS SIN  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**PAGINACION**

**DISCONTINUA**

## Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México, al Posgrado de Ingeniería de la UNAM y a mis profesores que contribuyeron a lograr este objetivo.

Al apoyo económico brindado durante estos dos años por ERN Ingenieros Consultores a través de la beca "LUIS ESTEVA MARABOTO".

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM por su apoyo en este trabajo.

A mi tutor y director de tesis Dr. Eduardo Reinoso Angulo a quien agradezco enormemente su tiempo, paciencia, asesoría y apoyo brindados en este trabajo.

A los Doctores Luis Esteva Maraboto, Mario Ordaz Shroeder, Sonia Elda Ruiz Gómez, y Jaime García por la revisión hecha a este trabajo.

A mis compañeros de maestría, gracias por estar ahí.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico el presente contenido de mi trabajo profesional.

NOMBRE: CESAR AUGUSTO ARREDONDO  
SELER

FECHA: 3/11/2003

FIRMA: [Firma]

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## Dedicatoria

A Dios, por escucharme siempre y darme tiempo para poder vivir.

A mi madre, Amparo Vélez Gómez, por enseñarme las cosas más simples pero las más importantes de la vida.

A mi padre, Aquileo Antonio Arredondo Vélez, por darme el mejor ejemplo y enseñarme a apreciar lo que la vida me dio.

A mi hermana Marta Liliana Arredondo Vélez por tener siempre algo bonito, con profundo agradecimiento.

A mis amigos(as) que siempre estuvieron dispuestos a darme una palabra de aliento o una crítica cuando era necesario.

A los que estuvieron en mi vida durante todo este tiempo y que cada día me enseñaron algo nuevo.

C

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## CONTENIDO

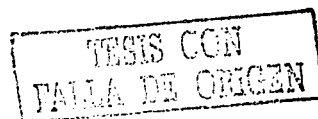
INTRODUCCIÓN	i
CAPITULO I	
HERRAMIENTAS EMPLEADAS EN EL MODELADO DEL MOVIMIENTO DEL SUELO	1
1.1 DEFINICIÓN DE ALGUNOS CONCEPTOS EN LA PREDICCIÓN SÍSMICA	1
1.1.1 Sismos	1
1.1.2 Mecanismo focal	2
1.1.3 Dimensionamiento de sismos	2
1.1.4 Geometría de falla, momento sísmico $M_0$ y caída de esfuerzos	2
1.2 REPRESENTACIÓN NUMÉRICA PARA LOS NIVELES SÍSMICOS DE DISEÑO	3
1.2.1 Espectros de respuesta	3
1.2.2 Acelerogramas	3
1.3 BASES DE DATOS: SISMOS REGISTRADOS Y REDES ACELEROMÉTRICAS	5
1.3.1 Características significativas de los registros acelerométricos	7
1.3.2 Defectos encontrados en algunos registros acelerométricos	8
<i>Registros no representativos en un sitio</i>	8
<i>Amplitudes muy bajas</i>	8
<i>Registros incompletos</i>	9
<i>Pulsos repetidos</i>	10
1.4 CLASIFICACIÓN DE LOS REGISTROS SÍSMICOS DE LA RED ACELEROMÉTRICA DE MÉXICO	10
CAPITULO II	
ALGUNOS MODELOS EXISTENTES PARA LA GENERACIÓN DE ACELEROGRAMAS	12
2.1 SIMULACIÓN DE ACELEROGRAMAS CONSIDERANDO LA DENSIDAD ESPECTRAL DEL MOVIMIENTO	12
2.1.1 Generación numérica de acelerogramas	13
2.2 SIMULACIÓN DE MOVIMIENTOS SÍSMICOS CONSIDERANDO PARÁMETROS SISMOTECTÓNICOS	14
2.2.1 Modelo de Boore (1983)	14

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

d

2.2.2 Modelo teórico de fuente $\omega^2$ - Boore (1983)	14
2.2.3 Modelado matemático a partir de funciones de Green empíricas	16
<i>Método de Irikura</i>	16
<i>Método de Joyner y Boore</i>	17
<i>Ordaz y otros (1995)</i>	18
2.3 SIMULACIÓN DEL MOVIMIENTO DEL SUELO EN UN SITIO, PARA UNA INTENSIDAD DADA Y UNA LOCALIZACIÓN DEL ORIGEN DESCONOCIDA (MODELO DE ALAMILLA Y OTROS, 2001)	19
2.4 EXPRESIÓN EMPÍRICA DE GUERRERO DEL ANGEL Y OTROS (1997)	20
2.5 EXPRESIÓN EMPÍRICA DE HUERTA GÁRNICA (2001)	21
<b>CAPITULO III</b>	
<b>ESTIMACIÓN DE LA RESPUESTA DEL MOVIMIENTO DEL SUELO PARA EVENTOS FUTUROS UTILIZANDO DIFERENTES MODELOS</b>	<b>23</b>
3.1 PARÁMETROS EMPLEADOS PARA EL MÉTODO DE LAS FUNCIONES EMPÍRICAS DE GREEN.	23
3.2 ESTIMACIÓN DE MOVIMIENTOS DEL SUELO PARA DIFERENTES MODELOS	29
3.2.1 Espectros de respuesta obtenidos a partir de los modelos de Guerrero del Angel (1997) y Huerta Gárnica (2001)	29
3.2.2 Espectros de respuesta obtenidos a partir del modelo de funciones empíricas de Green (Ordaz y otros - 1995)	31
<b>CAPITULO IV</b>	
<b>OBTENCIÓN DE SIMULACIONES PARA UNA INTENSIDAD DADA EMPLEANDO FUNCIONES EMPÍRICAS DE GREEN</b>	<b>36</b>
4.1 METODOLOGÍA	36
4.1.1 Acelerogramas	37
4.1.2 Espectros de respuesta de las simulaciones realizadas para una intensidad dada	40
4.2 APLICACIÓN PARA ALGUNOS SITIOS DE LA CIUDAD DE MÉXICO	42
4.2.1 Obtención de simulaciones para una intensidad dada	42
4.2.2 Espectros de respuesta de las diferentes simulaciones	51
<b>CAPITULO V</b>	
<b>NÚMERO DE ACELEROGRAMAS Y CONFIABILIDAD DE UN EDIFICIO DE 12 NIVELES AFECTADO POR EVENTOS FUTUROS DE DIFERENTES FUENTES SISMOLÓGICAS</b>	<b>56</b>
5.1 PROCEDIMIENTO	56

e



5.1.1 Número de acelerogramas para evaluar la respuesta de una estructura	56
5.1.2 Determinación de la confiabilidad de un sistema estructural	56
5.2 APLICACIÓN	59
5.2.1 Obtención del número de acelerogramas	59
5.2.2 Determinación de la confiabilidad estructural	83
CONCLUSIONES	89
REFERENCIAS	92
APENDICE A	96
APENDICE B	109
APENDICE C	136

S

TESIS CON  
PALA DE ORIGEN



---

## ACELEROGRAMAS EN LA CIUDAD DE MEXICO ANTE SISMOS FUTUROS

---

### INTRODUCCIÓN

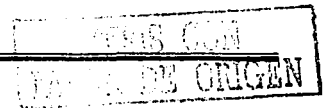
La actividad sísmica que se presenta en México es de gran interés por parte de investigadores e ingenieros, como punto de partida para desarrollar trabajos concernientes a explicar los efectos del movimiento fuerte del terreno, aplicando ciertos criterios de diseño y análisis que permitan evitar el colapso estructural.

El mal desempeño sísmico de estructuras sísmicas modernas durante los eventos recientes, implica la necesidad de replantear los métodos actuales de diseño que se vienen implementando desde hace algún tiempo, para así controlar eficientemente la respuesta dinámica de las estructuras durante excitaciones representativas de los diferentes niveles sísmicos de diseño. En general en el diseño de una estructura se pone mucho énfasis en la resistencia y la rigidez de la misma, y se olvida poner atención a las demandas que pueden ser relevantes en su desempeño sísmico, en este caso la aceleración.

Para caracterizar de forma correcta la respuesta de una estructura es necesario contar con historias detalladas del movimiento del suelo en un sitio durante sismos, lo que a veces resulta difícil para llevar un análisis confiable. Por ello se han desarrollado modelos matemáticos de procesos estocásticos para representar de forma detallada las características del movimiento del suelo para posibles eventos futuros. Algunos parámetros sísmicos como la magnitud, la distancia al epicentro, la aceleración máxima del terreno entre otras, la duración, se han utilizado de forma conjunta para comprender el potencial del temblor y sus efectos. La estimación o simulación de futuros movimientos del suelo en determinado lugar, para un sismo postulado de magnitud conocida  $M$  es un problema fundamental tanto para sismólogos como para ingenieros sísmicos. Muchos autores han presentado propuestas para evaluar o simular movimientos sísmicos del suelo. Alamilla y otros (2001) encuentran un procedimiento para generar acelerogramas sintéticos en terreno firme considerando la historia en el tiempo de las aceleraciones como un proceso gaussiano estocástico no estacionario, cuyos parámetros dependen de la magnitud y de la distancia al punto de ocurrencia. Iyama y Kuwamura (1999) presentan un método de transformación de ondas para la simulación de movimientos de suelos desde el punto de vista de la energía de entrada en las estructuras. Hartzell (1978) propone el método de las funciones de Green el cual es mejorado por Ordaz y otros (1995), en este se utilizan pequeños sismos como funciones empíricas de Green para estimar movimientos del suelo para eventos mayores en el futuro conociendo la caída de esfuerzos y el momento sísmico para cada evento, entre otros.

Como vemos existen muchos trabajos que muestran el desarrollo de varios esquemas para la simulación de acelerogramas. Sin embargo estas técnicas involucran el conocimiento de conceptos de ingeniería sísmica que no son conocidos en la práctica profesional y que difícilmente serán asimilados por los ingenieros. Por ello, los ingenieros no emplean estas técnicas de simulación y prefieren recurrir al uso de acelerogramas registrados que en la mayoría de los casos poco tienen que ver con las condiciones del sitio donde se pretende construir una estructura. El ejemplo más obvio es el registro de la estación SCT obtenido durante el sismo del 19 de septiembre de 1985, que es usado por ingenieros e investigadores en otros sitios que presentan un periodo del terreno diferente al registrado; el periodo del suelo para este registro es de 2.0 segundos.

Lo que pretendemos con este trabajo es proponer una herramienta de fácil uso para la ingeniería: la programación de un modelo de acelerogramas sintéticos que simule el comportamiento del suelo durante un sismo, el cual considere parámetros conocidos como el periodo dominante del suelo en el sitio donde se tiene pensado construir la estructura, y permita evaluar las características mecánicas y dinámicas de la misma. Se presenta un procedimiento para obtener acelerogramas sintéticos, provenientes de diferentes zonas sísmicas, asociados a una intensidad particular del espectro de peligro uniforme en diferentes sitios de ciudad de México y se evalúa el comportamiento de una estructura de 12 niveles para cada evento.



## CAPITULO I

## HERRAMIENTAS EMPLEADAS EN EL MODELADO DEL MOVIMIENTO DEL SUELO

## 1.1 DEFINICIÓN DE ALGUNOS CONCEPTOS EN LA PREDICCIÓN SÍSMICA

## 1.1.1 Sismos

Los sismos o temblores de tierra son vibraciones de la corteza terrestre generadas por distintos fenómenos, como la actividad volcánica, la caída de techos de cavernas subterráneas e incluso por explosiones. Sin embargo los sismos más importantes y más severos desde el punto de vista de la ingeniería son de origen tectónico, que se deben al desplazamiento de las placas que componen la corteza terrestre. Las presiones que se generan en la corteza por el flujo de magma desde el interior de la tierra llegan a vencer la fricción que mantiene en contacto los límites entre placas produciendo caídas de esfuerzos y liberación en forma de ondas vibratorias, de enormes cantidades de energía almacenada a través de la roca de la corteza. La gran mayoría de los sismos en el mundo ocurre en las fronteras entre placas; este tipo de movimientos se denominan *sismos tectónicos*; un porcentaje pequeño de los sismos ocurre en el interior de las placas tectónicas y reciben el nombre de *sismos intraplaca*.

México se encuentra en una región del planeta intensamente afectada por sismos de diferentes orígenes. Es en la zona costera del Pacífico, hacia el sur, donde principalmente se acumulan grandes cantidades de energía que al liberarse inducen vibración de la corteza terrestre y ponen en peligro las estructuras que sobre ella se desplantan. Al ser estas solicitadas por el movimiento presente en su base; el movimiento de las masas de las estructuras genera fuerzas de inercia en la sección que introducen esfuerzos importantes en los elementos estructurales y que pueden llevarla a la falla. México se ve afectado principalmente por tres grupos de sismos:

Sismos de subducción, los cuales presentan mecanismos del tipo de falla inversa debido a la liberación de energía acumulada entre zonas de interacción de las placas a lo largo de sus límites convergentes, esto ocurre principalmente en el Pacífico entre la placa Norteamericana y las placas de Cocos y Rivera o entre la placa del Caribe y la placa de Cocos al sureste mexicano. Este tipo de eventos provenientes de algunos segmentos de la zona de subducción presentan periodos de recurrencia relativamente pequeños respecto a otras zonas de subducción del mundo ( $T_R = 30$  a 40 años). Debido a que ocurren con mayor frecuencia se tiene mas información registrada en la red acelerométrica y, por su cercanía, representan un grave peligro para las poblaciones costeras. Además son los que producen los movimientos más violentos en el valle de México debido a que el tipo de ondas que llegan son de período largo, sufren menos atenuación y experimentan amplificación al cruzar las arcillas del lago.

Sismos de falla normal, que representan un gran peligro para las ciudades ubicadas a lo largo de la faja volcánica y ocurren a profundidades mayores a 50 km. Este tipo de sismos se localiza dentro de las placas oceánicas que subducen bajo el continente y ocurren cuando el esfuerzo aplicado sobre el plano de la roca es de tensión lo cual produce grandes deformaciones y posterior rompimiento. La magnitud de estos sismos rara vez llega a sobrepasar 7.0 y ocurren con menor frecuencia que los sismos de la costa; sin embargo debido a la ubicación y a la cercanía de las grandes poblaciones representan un alto riesgo.

Sismos intraplaca, que se originan en el interior de la placa de Norteamérica a profundidades no mayores de 30 km; por lo general presentan tipo fallas de corte o normales aunque pueden tener algunos mecanismos de tipo compresivo o estar asociados a actividad volcánica. Este tipo de sismos que ocurren en todo el mundo son causados por esfuerzos acumulados de presiones desarrolladas en las fronteras de placas, pueden alcanzar magnitudes hasta 6.5 y por su poca profundidad y ubicación son de suma importancia para las poblaciones cercanas al epicentro. Son movimientos ricos en energía de alta frecuencia y pueden causar daño a pequeñas estructuras que usualmente no son afectadas por sismos grandes y distantes.

### 1.1.2 Mecanismo focal

Al ocurrir un sismo, el punto donde se inicia la ruptura es el lugar donde se origina la liberación de energía y se conoce con el nombre de hipocentro o foco del sismo. Para un sismo pequeño es razonable considerar el hipocentro como el punto donde se libera energía, mientras que para un sismo grande la ruptura puede involucrar miles de kilómetros cuadrados de superficie de falla; el punto de inicio de la liberación de energía sigue siendo el foco o hipocentro pero en general no será muy descriptivo de la zona de fallamiento.

Por otro lado, se llama epicentro a la proyección sobre la superficie de la Tierra del hipocentro y la profundidad focal será la profundidad del hipocentro, medida desde el epicentro. Otro concepto importante es la distancia focal, la cual representa la distancia al hipocentro desde un punto cualquiera de referencia.

Dado que la superficie de la roca en la falla no es lisa ni uniforme, la propagación de la ruptura a través de ella no ocurre a una velocidad constante, sino a través de una serie de movimientos súbitos. Esto explica la forma irregular y aleatoria de las ondas que produce un sismo. La zona de ruptura se extiende desde el foco en todas las direcciones, llegando a la superficie en algunos casos. La forma como ocurre la ruptura será diferente dependiendo de la profundidad del foco, pues a medida que esta se incrementa las características de la roca allí son diferentes.

### 1.1.3 Dimensionamiento de sismos

La magnitud del sismo  $M$  es una medida del tamaño del evento, en función de la energía liberada. Este es un concepto instrumental que no depende de la distancia ni de la posición del observador. El concepto de magnitud fue introducido en 1935 por Charles Francis Richter, sismólogo del Instituto de Tecnología de California, para medir los terremotos locales y así poder estimar la energía por ellos liberada a fin de ser comparados con otros terremotos. Posteriormente, el uso de esta escala se extendió y fue aplicándose a los diferentes terremotos que ocurrían en el mundo. La magnitud está asociada a una función logarítmica calculada a partir de la amplitud de la señal registrada por el sismógrafo ( $M_L$ ,  $M_s$ ,  $m_b$ ) o a partir de su duración ( $M_D$ ) sobre el sismograma.

El cálculo de la magnitud de un terremoto debe ser corregida dependiendo del tipo de sismógrafo utilizado, distancia epicentral, profundidad del foco y además del tipo de suelo donde está ubicada la estación de registro. Esta escala por su naturaleza, permite obtener medidas negativas del tamaño de un terremoto y en principio no tiene límites para medir magnitudes grandes. En realidad, su valor mínimo dependerá de la sensibilidad del sismógrafo y su valor máximo de la longitud máxima de la falla susceptible a romperse de un solo golpe.

La intensidad del sismo es una medida subjetiva de los efectos que el sismo causa en un lugar determinado, la cual se realiza por medio de observadores, que se desplazan a las diferentes zonas afectadas por el evento y allí asignan la intensidad para cada sitio, de acuerdo con los efectos observados. Por lo tanto no es una medida única para un sismo, dado que el efecto producido en diferentes lugares por el mismo sismo es distinto y que en la medida que el lugar se encuentre mas alejado de la zona epicentral menores serán los efectos. A fin de no confundir magnitud e intensidad, dos terremotos de igual magnitud pueden generar en superficie intensidades muy diferentes.

### 1.1.4 Geometría de falla, momento sísmico ( $M_0$ ) y caída de esfuerzos ( $\Delta\sigma$ )

Durante los últimos años, los sismólogos han preferido el uso del momento sísmico  $M_0$  para cuantificar el tamaño de un temblor, por ser éste uno de los parámetros sísmicos que se determinan con mayor precisión. Este parámetro está basado en el principio de que el movimiento a lo largo de una falla lo produce un par de fuerzas que actúan en sentido opuesto a uno y otro lado de la falla.

El momento sísmico es función del desplazamiento relativo a lo largo de la falla ( $D$ ), del área de ruptura ( $S$ ) y de la rigidez del medio ( $\mu$ ) en que el temblor se origina. La orientación de la falla, la dirección del movimiento y el tamaño del terremoto puede ser descrito por la geometría de la falla y el momento sísmico. Estos parámetros pueden ser determinados a partir del análisis de las formas de onda de un terremoto. Las diferentes formas y direcciones del movimiento de las ondas registradas a diferentes distancias y azimutes desde el foco del terremoto, son usadas para determinar la geometría de la falla y la amplitud de la onda para conocer el momento sísmico. El momento sísmico puede ser relacionado con los parámetros de la falla mediante la relación de Aki (1967) dada por la expresión 1.1:

$$M_o = \mu \cdot S \cdot D \quad (1.1)$$

Por lo tanto el momento sísmico es una medida del tamaño de un terremoto y hoy en día es el parámetro más importante. Este factor ha dado lugar a la definición de una nueva escala de magnitud basada en el momento sísmico (Hanks y Kanamori, 1979), denominada magnitud de momento dada por la expresión 1.2:

$$M_w = \frac{2}{3} \cdot \log M_o - 10.7 \quad (1.2)$$

Por otro lado, la caída de esfuerzos  $\Delta\sigma$ , se define como la diferencia entre los esfuerzos antes y después de ocurrido el terremoto y como se verá más adelante, es un parámetro que presenta mucha incertidumbre y del cual poco se sabe. Como no se cuenta con un rango de valores para  $\Delta\sigma$  medidos u observados, no es posible determinar cuales de ellos ocurren con mas frecuencia o lo que es lo mismo, no es posible graficarlos en forma de un histograma de frecuencias y ajustarles una función de densidad de probabilidad que describa la variable de interés.

## 1.2 REPRESENTACIÓN NUMÉRICA PARA LOS NIVELES SÍSMICOS DE DISEÑO

Conforme se desarrollan nuevas investigaciones, se ha identificado la necesidad de replantear la representación numérica de las excitaciones sísmicas de diseño, considerando los parámetros de respuesta relevantes para diferentes niveles sísmicos (Bertero, 1997). Aunque existen varios planteamientos de interés, la mayor parte del esfuerzo de investigaciones se ha concentrado en los espectros de respuesta y los acelerogramas reales o simulados.

### 1.2.1 Espectros de respuesta

En general, un espectro de respuesta presenta un resumen gráfico de la interacción que las características mecánicas de la estructura tienen con las características dinámicas de la excitación sísmica. Esto aporta la información necesaria para que el diseñador pueda evaluar el efecto que tiene en el comportamiento sísmico de la estructura a diseñar.

### 1.2.2 Acelerogramas

También se ha señalado la necesidad de utilizar durante el diseño sísmico algunos grupos de acelerogramas reales o sintéticos que sean consistentes con los niveles sísmicos de diseño. Se ha planteado que estos acelerogramas pueden usarse durante las etapas del diseño sísmico para determinar las características mecánicas de la estructura a nivel global. Además este tipo de herramientas se pueden emplear para la revisión de los diseños, que consiste en que un modelo analítico del diseño preliminar de la estructura se sujete a la acción de dichos acelerogramas (reales o sintético), con el fin de establecer si la respuesta dinámica cumple con los objetivos de diseño de la estructura para posteriormente ajustar el diseño preliminar y así obtener un mejor diseño final.

Para efectos de ingeniería la información registrada por los acelerógrafos la cual se denomina acelerogramas representa los valores de la aceleración horizontal del terreno medidos en tres direcciones ortogonales (NS, EW y vertical, generalmente). En la Figura 1.1 se muestra el registro tomado para el sismo de México del 19 de septiembre de 1985 en la estación SCT de la Ciudad de México.

Este es un registro típico de la zona de suelo blando del valle de México, para un sismo de gran magnitud  $M = 8.7$  pero registrado muy lejos de la zona epicentral. El temblor se originó en el Océano Pacífico, en el estado de Michoacán, a más de 400 km de Ciudad de México. Presenta una aceleración máxima no muy grande, del 16% de la gravedad aproximadamente, una extraordinaria duración y periodos muy largos. Además es un registro tomado en la estación SCT en la superficie del valle donde existen depósitos de arcilla entre la roca y la superficie, los cuales amplificaron la onda. Un movimiento de este tipo es poco severo para estructuras muy rígidas, que se caracterizan por periodos cortos, pero muy peligroso para las estructuras altas y muy flexibles que tienen periodos naturales de vibración largos.

Desde hace mucho tiempo se sabe que la estratigrafía del suelo en el sitio tiene una influencia importante en los daños observados. Sólo en la medida en que se tiene un mayor número de acelerógrafos, de registros, en lugares cercanos al epicentro de un sismo, es posible evaluar las variaciones de los acelerogramas dependiendo de las condiciones del suelo adyacente, bajo la consideración de que la rigidez del suelo y sus características de amortiguamiento, así como la magnitud del sismo y la distancia hipocentral, son parámetros muy relevantes.

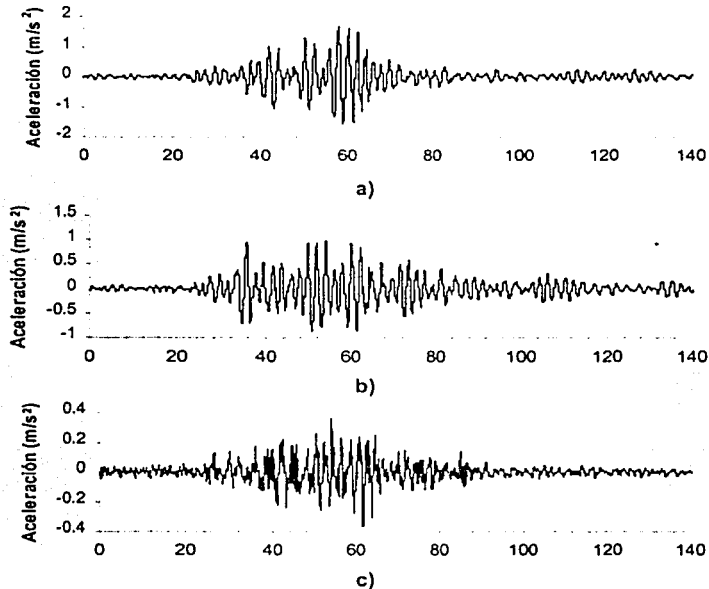


Figura 1.1 Acelerograma para el sismo de México en Michoacán del 19 de septiembre de 1985, registro estación SCT; a) componente EW, b) componente NS, c) componente V.

Un caso clásico de este tipo de fenómenos es la enorme amplificación de las ondas sísmicas en el valle donde se encuentra localizada la Ciudad de México debido a que estas sufren reflexiones

sucesivas en la frontera entre estratos. Este fenómeno se presenta especialmente en sitios de terreno blando (por ejemplo, SCT) y se evidenció en sismos como el del 19 de Septiembre de 1985.

Cuando el acelerograma registrado es un movimiento que tiene duración moderada, por lo general está asociado con distancias focales moderadas y ocurre únicamente en suelo firme; este tipo de registros suele tener la misma forma en las tres direcciones principales (EW, NS y V). En la Figura 1.2 se puede apreciar esto para el sismo del 19 de septiembre de 1985 registrado por la estación CU en terreno firme con un periodo dominante del terreno de 0.5 segundos.

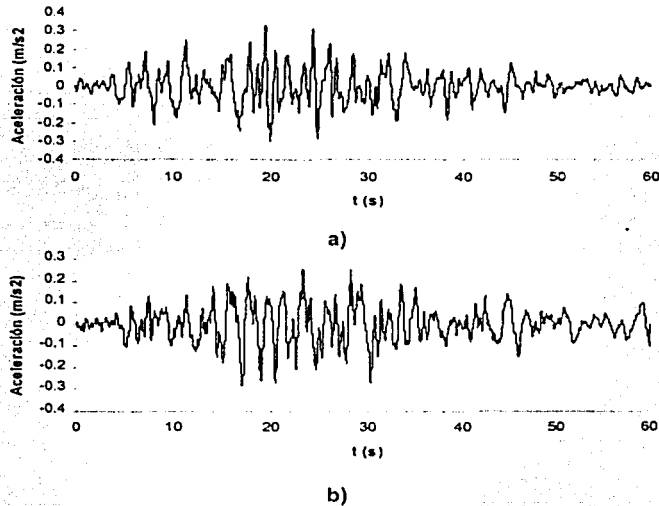


Figura 1.2 Acelerograma para el sismo de México en Michoacán del 19 de septiembre de 1985, registro estación CU; a) Componente EW, b) Componente NS.

### 1.3 BASES DE DATOS: SISMOS REGISTRADOS Y REDES ACELEROMÉTRICAS

Los primeros trabajos de exploración y laboratorio para conocer las propiedades del subsuelo en la zona céntrica de la ciudad de México contribuyen con la microzonificación sísmica. Debido a que el sismo de Guerrero de 1957 ( $M = 7.7$ ) provocó muchos daños se promovieron estudios sobre el valle de México que terminaron en el reglamento de microzonificación sísmica. Pero es después de los sismos de 1985 ( $M = 8.1$  y  $M = 7.6$ ) originados en las costas de Michoacán con gran poder destructivo que se evidenció la importancia de los efectos de sitio. Son estas evidencias y estudios sobre el subsuelo de la ciudad de México (Marsal y Mazari, 1959) los que conducen a la obtención de mapas que mostraban las zonas en las que más daños se presentaron (Microzonificación 1987) y a estudios que correlacionan la intensidad sísmica con los efectos de sitio permitiendo la identificación de zonas de alta intensidad. La nueva versión de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo del Reglamento de Construcciones (2002) para el Distrito Federal incluye una subdivisión de zonas por intervalos de periodos dominantes del terreno.

Debido a que la ocurrencia de temblores es un fenómeno que requiere un lapso para que se acumule energía suficiente seguido de movimientos de magnitud significativa, solo con el paso de los años se logra reunir información gráfica de una diversidad de movimientos, los cuales se

identifican por su fecha, magnitud, localización del epicentro y por los daños causados durante su ocurrencia. Afortunadamente México cuenta con una red acelerométrica en la costa del Pacífico y en la ciudad de México que le permiten a la ingeniería contar con un volumen de información importante que refleja las características y propiedades de los movimientos fuertes del terreno y sirve como base a posteriores investigaciones (ver Figura 1.3).

En las Figuras 1.3 y 1.4 se muestra la zonificación geotécnica, la ubicación de las estaciones acelerométricas y las principales avenidas de la ciudad. A partir de 1985 crece considerablemente la red acelerométrica de México, instrumentándose gran parte del valle en las zonas donde históricamente se han presentado mayores daños durante sismos intensos. En la Tabla 1.1 se presentan la relación de los sismos más recientes (pequeños, moderados y grandes) y algunas de sus propiedades, tales como sus coordenadas geográficas, la aceleración máxima  $A_{MAX}$  registrada en el componente EW en CU, la profundidad y el tipo de falla que lo produjo, entre otras.

Debido a que la intensidad y las características del movimiento sísmico pueden variar significativamente en dos sitios cercanos entre sí, en función de las condiciones del suelo y de los efectos topográficos locales, se ha planteado la posibilidad de microzonificar las regiones expuestas a un peligro sísmico importante, en particular los centros urbanos. Esto con el fin de reducir la incertidumbre involucrada en el diseño sísmico de las estructuras, acerca de la intensidad de los movimientos que se pueden esperar en un sitio.

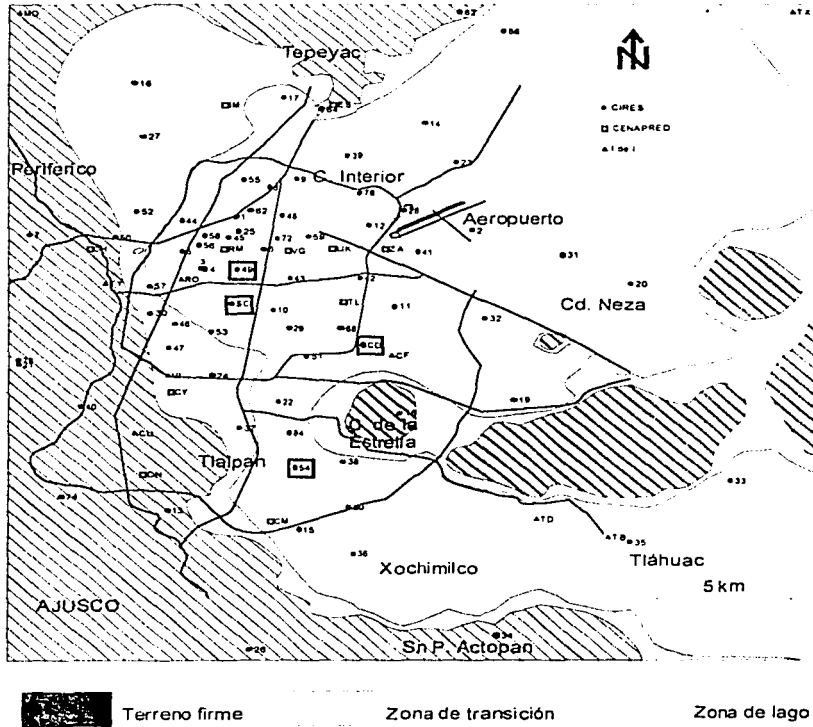
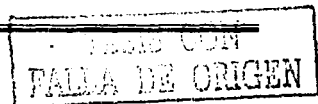


FIGURA 1.3 Zonificación geotécnica, algunos sitios de interés y estaciones del valle de México.



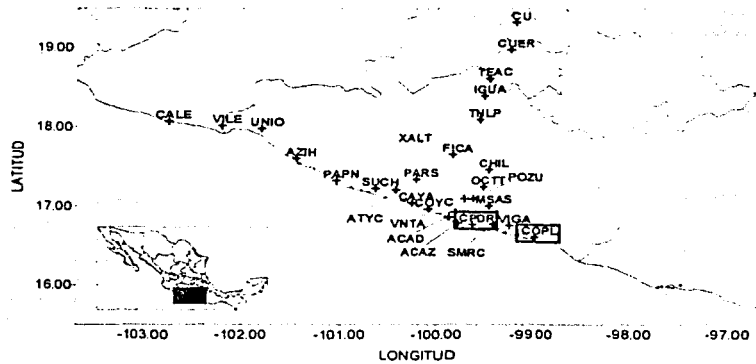


FIGURA 1.4 Localización de algunas estaciones de la Red Acelerométrica de Guerrero y de las estaciones en el trayecto de Acapulco a CU.

Tabla 1.1 Algunos sismos registrados por la red acelerométrica de Ciudad de México.

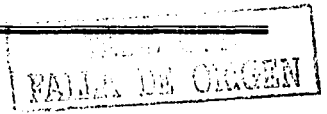
Fecha dd/mm/yy	Origen	Mag. (M)	Lat. (N)	Long. (W)	Prof. (Km)	Dist.- CU R (km)	Azím - CU (°)	A <sub>max</sub> (gales)
19/09/85	Sub.	8.0	18.14	102.71	16	250	185	34.07
25/04/89	Sub.	6.9	16.58	99.48	17	280	175	10.53
24/10/93	Sub.	6.6	16.77	98.61	22	280	240	3.49
10/12/94	Sub.	6.6	15.81	98.79	20	280	170	5.6
14/09/95	Sub.	7.3	16.73	98.54	22	310	230	7.65
21/09/85	Sub.	7.6	17.62	101.82	20	300	210	14.8
08/02/88	Sub.	5.8	17.49	101.16	19	270	188	2.39
02/05/89	Sub.	4.9	16.64	99.51	13	290	210	1.9
11/05/90	Sub.	5.5	17.24	100.56	12	290	210	1.91
31/05/90	Sub.	5.9	16.77	100.12	16	200	225	3.21
09/10/95	Sub.	8.0	19.34	104.80	15	515	260	1.28
23/05/94	Norm.	6.2	18.02	100.57	50	200	120	4.28
15/06/99	Norm.	7.0	18.13	97.54	61	230	150	11.85
30/09/99	Norm.	7.4	16.03	96.96	47	420	160	7.80
21/07/00	Norm.	5.9	18.11	98.97	50	145	160	12.48

### 1.3.1 Características significativas de los registros acelerométricos

Después de un sismo, el registro es recopilado y almacenado en un banco de información en las diferentes estaciones de la red acelerométrica. La utilidad y la confiabilidad de los resultados que se obtengan a partir de ellos, implica realizar una selección previa de aquellos registros que posean una calidad aceptable; esto considerando que el objetivo inmediato es obtener acelerogramas sintéticos que representen en buena forma el movimiento del suelo en un sitio del Valle de México.

Una interpretación visual más exhaustiva y unas pocas medidas a escala de los acelerogramas pueden revelar aspectos muy significativos del movimiento sísmico como son; aceleración máxima del terreno, contenido de frecuencias o períodos de las ondas predominantes, relación entre amplitudes de las oscilaciones verticales y horizontales, la duración de la fase de movimiento intenso e incluso la distancia epicentral.

Se emplean equipos especiales para registrar los movimientos del suelo como son los acelerógrafos digitales, para los cuales se impone un umbral de disparo, el cual consiste en un





determinado valor de aceleración que una vez rebasado por la presencia del movimiento fuerte del terreno, activa el equipo y comienza a almacenar la información; este umbral tiene una función muy importante que es la de descartar cualquier movimiento o vibración que no sea un temblor. Estos umbrales deben ser lo suficientemente altos para no estar continuamente registrando ruido o movimientos leves, y a la vez lo suficientemente bajos para captar completamente los sismos importantes; los umbrales de referencia se fijan considerando las condiciones del sitio o el ruido ambiental presente.

El ruido ambiental es producido por vibraciones o excitaciones de carácter ambiental naturales (temblores locales) o artificiales (tráfico vehicular, maquinaria, explosiones, etc.), mientras que el concepto de efectos de sitio se relaciona con el tipo de suelo en donde se ubique el acelerógrafo y definirá el umbral de referencia particular a utilizar.

### 1.3.2 Defectos encontrados en algunos registros acelerométricos

Es posible que los registros de aceleraciones en ciertas ocasiones no representen en buena forma el movimiento del suelo ante un sismo, esto se debe a que existen diversos factores externos que pueden alterar la información, como son: condiciones del sitio en donde está instalado el equipo de medición, la calibración del mismo, su operación y el mantenimiento, entre otros. No resulta por lo tanto conveniente obtener resultados a partir de registros alterados; a continuación se describen y ejemplifican algunos de los más frecuentes defectos encontrados en los registros de aceleraciones durante la inspección previa de la Base Mexicana de Datos de sismos fuertes con el objetivo de realizar una preselección de la información que nos será útil para el trabajo que venimos realizando.

#### *Registros no representativos en un sitio*

Es posible encontrar registros que no representen con certeza las características dinámicas del terreno para las condiciones presentes en el sitio. Como ejemplo se puede citar el sismo registrado el 2 de mayo de 1989, cuyo origen es de subducción, por la estación 20 (Nezahualcoyotl) que se encuentra en la zona de lago de la ciudad de México (ver figura 1.3). El acelerograma registrado presenta bajas amplitudes y es de corta duración, lo cual se puede atribuir a que, siendo un sismo de baja magnitud ( $M_s = 4.9$ ) provocó en la estación mencionada, en terreno blando del Valle de México, movimientos apenas perceptibles. Algunos ejemplos de este tipo de registros podemos ver en la Figura 1.5.

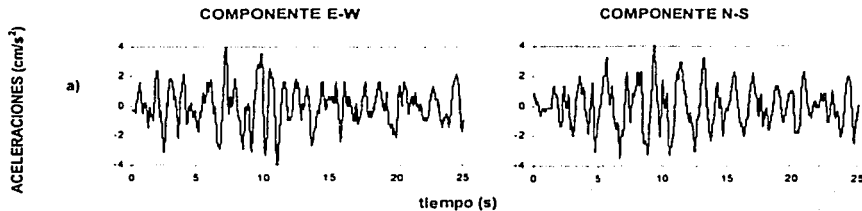


Figura 1.5 Registros no representativos en la estación 20.

#### *Amplitudes muy bajas*

Este problema en los registros se presenta ante aceleraciones del terreno muy bajas y la naturaleza digital de los acelerómetros, lo cual se identifica con la presencia de escalones de amplitud constante en intervalos continuos de tiempo como se puede ver en la Figura 1.6.

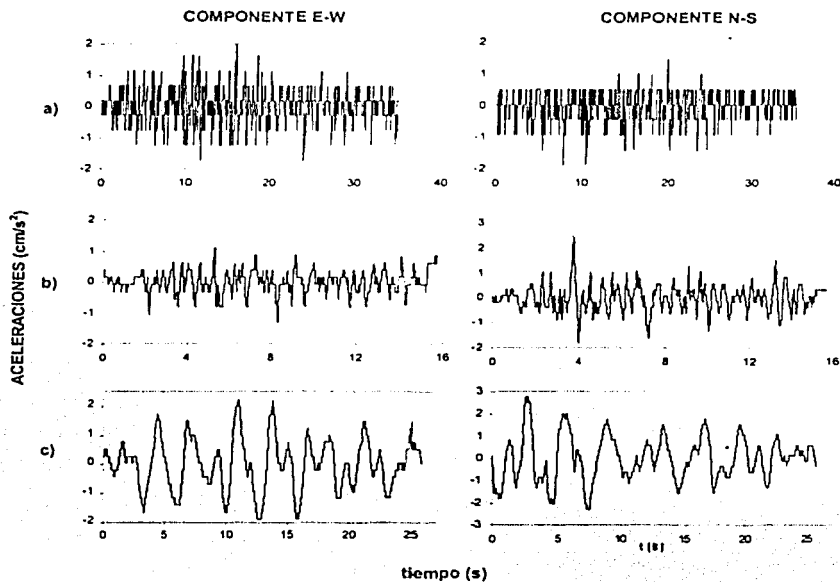


Figura 1.6 Registros con amplitudes muy bajas.

### Registros incompletos

Esta alteración se evidencia en aquellos acelerogramas cortados o interrumpidos. Este tipo de fallas pueden ser causadas por errores del sistema eléctrico o electrónico en la estación acelerométrica, por el valor impuesto al umbral de disparo o por defectos en el equipo de registro. Algunos defectos de este tipo se pueden ver en la Figura 1.7.

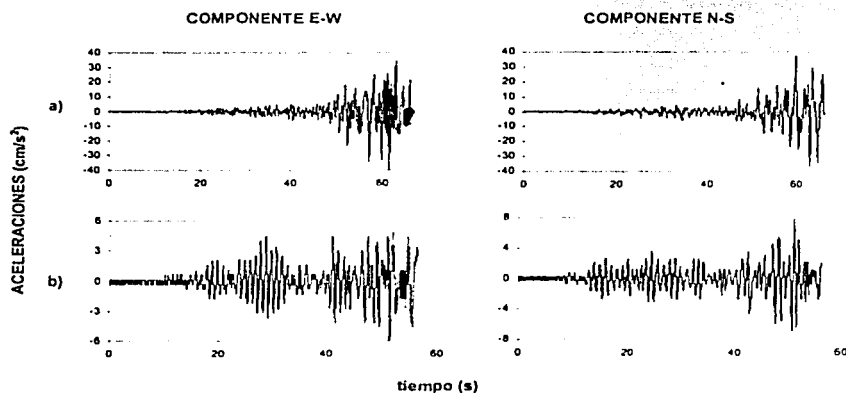


Figura 1.7 Registros incompletos.

### Pulsos repetidos

Este tipo de defectos de los registros sísmicos se caracteriza por la presencia de pulsos idénticos en un intervalo limitado de tiempo en el acelerograma. Son generados por una posible deficiencia en la extracción de datos de la cinta magnética a cualquier equipo de cómputo y suelen ocurrir al mismo tiempo en las tres componentes del movimiento. En la Figura 1.8 se presentan algunos ejemplos de este caso.

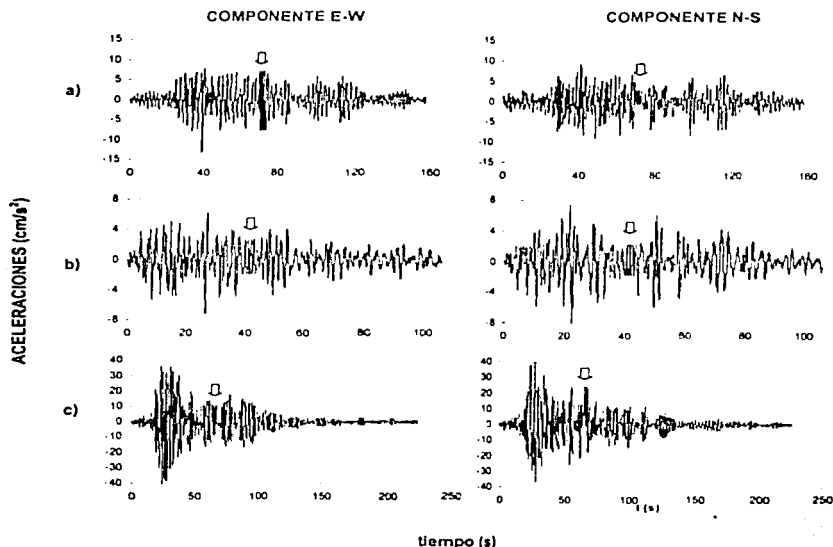


Figura 1.8 Registros con pulsos repetidos en intervalos continuos de tiempo.

## 1.4 CLASIFICACIÓN DE LOS REGISTROS SÍSMICOS DE LA RED ACCELEROMÉTRICA DE MÉXICO

Se hizo un proceso de inspección, estudio y clasificación de la información existente considerando la calidad en la información registrada por la red acelerométrica del Valle de México consignada en la Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes (1999), con el fin de seleccionar cuáles sismos fueron bien registrados y por cuáles estaciones para descartar los problemas de digitalización mencionados en numerales anteriores durante la obtención de resultados.

El procedimiento de inspección consistió en identificar inicialmente todos aquellos registros captados por las diferentes estaciones de la red acelerométrica del valle de México ocurridos desde 1965, así como su fecha de ocurrencia, ubicación (latitud y longitud), profundidad, tipo de falla (subducción, normal o intraplaca) y la magnitud. Esta información se especifica en el anexo A (tabla A.1) y en la tabla A.2 se especifican las diferentes estaciones con su respectivo nombre, código y período dominante  $T_S$  del sitio donde se encuentra desplantada. En el Anexo A (tabla A.1) se puede observar que hay varias casillas sombreadas, debido a que son sismos no representativos cuyo foco se encuentra mar adentro lejos de la costa del Pacífico.

En segundo lugar se hace una inspección preliminar de cada uno de estos registros de tal forma que se puedan clasificar de acuerdo a su calidad; esto implicó una revisión visual del contenido de

los mismos. Los resultados definitivos de la evaluación de la calidad de los registros y de su agrupación por zonas considerando únicamente su localización se resumen en el anexo A (tablas A.3 y A.4, sismos aceptados y descartados respectivamente), cuyas columnas contienen las diferentes estaciones de la red acelerométrica y sus eventos registrados en orden cronológico, según la zona de procedencia.

Se identificaron 14 diferentes zonas para agrupar la información encontrada, a todo lo largo de la Costa del Pacífico de México y hacia el interior del país desde Michoacán hasta Oaxaca tal como se muestra en la Tabla 1.2. Se organizan los sismos por fecha de ocurrencia y de acuerdo a sus características de ubicación y de tipo de falla, se les asigna un código que posteriormente permitirá identificarlos en los mapas de distribución de focos sísmicos en México (ver Anexo A, figuras A.1, A.2 y A.3), los cuales dan una visión más clara de la actividad sísmica, en especial en la costa del Pacífico debido a sismos de subducción.

Tabla 1.2 Zonas definidas para la clasificación de la información sísmica registrada desde 1965.

Zona	Identificación
Z1	Colima
Z2	Michoacán
Z3	Límite Michoacán – Guerrero
Z4	Distrito Federal (D.F)
Z5	Puebla
Z6	Petalán
Z7	Guerrero
Z8	San Marcos
Z9	Ometepec
Z10	Oaxaca Oeste
Z11	Oaxaca Este
Z12	Límite Oaxaca - Chiapas
Z13	Chiapas
Z14	Límite Guatemala

La magnitud de los eventos referidos en las tablas A.1, A.2, A.3 y A.4, se mide en función de diferentes escalas y varía dependiendo del tipo de onda en el cual se basa la medición. Entre los diferentes tipos de escalas para medir la magnitud de un evento se emplean: la escala Richter ( $M$ ), la escala de ondas de cuerpo ( $m_b$ ) que es tomada en cuenta para eventos de magnitud pequeña o moderada ( $M \leq 6.5$ ) así como para eventos grandes de foco profundo que no generan ondas superficiales de amplitud importante, la escala de ondas superficiales ( $M_s$ ) que generalmente es el valor dado a los eventos de gran magnitud a distancias mayores de 1000 km cuyas ondas presentan períodos mayores y la escala de magnitud momento ( $M_w$ ) que representa de mejor forma el tamaño del sismo en función del área de ruptura y de la dislocación total de la fuente sísmica.

La clasificación de la información, se presenta en la Tabla A.5 al final del anexo A; está caracterizada por letras las cuales consideran ciertas condiciones de digitalización (automática, semiautomática o manual) y de tiempo (registro completo o incompleto) para los diferentes eventos de la base de datos de sismos fuertes del valle de México. Una revisión más exhaustiva permitió identificar cuáles registros no representan en buena forma el movimiento del suelo ante un sismo ocurrido, considerando los defectos descritos y ejemplificados en el numeral 1.5 (amplitudes muy bajas, pulsos repetidos, registros incompletos entre otros); los sismos descartados para el estudio están resumidos de igual forma en la tabla A.4 y en la figura A.3. Para facilitar la clasificación, se consideraron otras condiciones de los diferentes registros como son: su localización, el tamaño del evento sísmico, la profundidad del foco, qué tan representativos pueden llegar a ser en una zona determinada, qué número de estaciones lo registraron y si son registros excepcionales como dobles o si están incompletos.

## CAPITULO II

## ALGUNOS MODELOS EXISTENTES PARA LA GENERACIÓN DE ACELEROGRAMAS

Una predicción sísmica debería especificar el rango de magnitudes esperadas para el evento, el área geográfica dentro de la cual puede ocurrir, y el intervalo de tiempo de ocurrencia con suficiente precisión para que este suceso o una falla en la predicción pueda ser evaluado. Con respecto a la predicción en el tiempo se distingue entre predicciones: a largo plazo, cuando se realiza con años de anticipación, de plazo intermedio, cuando se realiza con semanas de anticipación y a corto plazo, cuando se hace con horas o días de anticipación. Desafortunadamente el estado del arte actual de la ingeniería no puede aún ser tan preciso.

El modelado del movimiento del suelo por medio de acelerogramas sintéticos permite generar registros de sismos postulados, de cierta magnitud en un sitio de interés en particular, los cuales se convierten en una herramienta fundamental para ingenieros y calculistas en el diseño y revisión de estructuras convencionales o no.

La gran ventaja del uso de este tipo de herramientas radica en que permite obtener un acelerograma representativo para un sismo supuesto con el cual se puede evaluar la respuesta de una estructura antes de que el evento sísmico ocurra, lo que permite manejar niveles de prevención y confiabilidad más altos. Además la obtención e interpretación de registros de sismos postulados futuros permitirá mejorar la manera actual de obtener espectros de diseño, buscando que estos estén asociados a aquellos sismos que sean generados por todas las fuentes potenciales en un sitio determinado, obteniendo espectros de respuesta de tamaños y formas diferentes, así como para diferentes duraciones.

## 2.1 SIMULACIÓN DE ACELEROGRAMAS CONSIDERANDO LA DENSIDAD ESPECTRAL DEL MOVIMIENTO

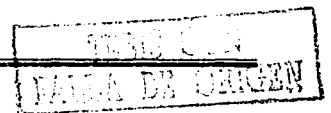
Es muy común en la práctica generar historias de tiempo basadas en una determinada forma de densidad espectral. Esto se considera debido a que la mayor parte del peligro sísmico en un sitio es debido a fuentes sísmicas que dan lugar a densidades espectrales con determinadas características, o bien cuando las propiedades locales del suelo filtran el movimiento y proporcionan espectros con frecuencias dominantes casi invariantes. Es posible entonces obtener sismos sintéticos con características de contenido de frecuencias, duración e intensidad específicas. La información que se requiere para poder representar en el dominio del tiempo los movimientos del terreno provocados por temblores se describe a continuación:

- El contenido de frecuencias del movimiento en un sitio dado, se puede obtener a través de espectros de amplitudes de Fourier  $|S(\omega)|$ , o de funciones de densidad espectral de potencia que dependan solo de la frecuencia  $G(\omega)$  o que evolucionen en el tiempo  $G(\omega, t)$ . Estas medidas se relacionan en el tiempo así:

$$G(\omega) = S(\omega)^2 / (\pi \cdot s) \quad \omega > 0 \quad (\text{valores positivos de la frecuencia}) \quad (2.1)$$

donde  $s$  es la duración del movimiento en cuestión.

- La duración del temblor  $s$ , se puede estimar considerando la intensidad de Arias (1969) que considera la energía acumulada de la aceleración del terreno en función del tiempo y utilizando expresiones como las propuestas por Boore y Joyner (1984) que dependen de la frecuencia natural del oscilador  $f_0$  y la duración del movimiento o tiempo entre los instantes en que se acumula el 5 % y el 95 % de la energía.
- La evolución de la intensidad a lo largo del tiempo, por medio de una función  $c(t)$ , que modula las amplitudes de las aceleraciones.



- La matriz de densidad espectral cruzada para simular acelerogramas correlacionados espacialmente.

### 2.1.1 Generación numérica de acelerogramas

*Proceso oscilatorio unidimensional:* considera la obtención de acelerogramas artificiales mediante la multiplicación de un proceso aleatorio estacionario  $z(t)$  y una función moduladora de la intensidad en el tiempo  $c(t)$  (ver expresión 2.2).

$$x(t) = c(t) \cdot z(t) \quad (2.2)$$

Donde el proceso  $z(t)$  se representa mediante la superposición de senoides con ángulos de fase aleatorios distribuidos uniformemente en el intervalo  $(0, 2\pi)$  como se muestra en la expresión (2.3) y  $N$  es un número tal que al multiplicarlo por el intervalo de frecuencias  $\Delta\omega$  produce la frecuencia límite superior  $\omega_u = N\Delta\omega$ .

$$z(t) = \sqrt{2} \cdot \sum_{i=1}^N A_i \cos(\omega_i t + \phi_i) \quad ; \quad A_i = \sqrt{2G_z(\omega)\Delta\omega} \quad (2.3)$$

La densidad espectral para este caso será:

$$G_x(\omega) = c(t)^2 G_z(\omega) \quad (2.4)$$

*Proceso oscilatorio unidimensional con amplitud y frecuencias moduladas:* es una manera más realista, pues considera que el contenido de frecuencias evoluciona durante el sismo. Esto es importante cuando los acelerogramas artificiales se utilicen para analizar la confiabilidad estructural de estructuras con un comportamiento no lineal. Por lo tanto:

$$x(t) = c(t) \cdot z(\Omega(t), A(t)) \quad (2.5)$$

Donde  $\Omega(t)$  es una función moduladora de las frecuencias y  $c(t)$  de la amplitud. Además la densidad espectral evolutiva estará dada por la expresión (2.6) y para la generación de muestras aleatorias en este proceso se empleará la expresión (2.7).

$$G_x(\omega, t) = c(t)^2 G_z(\omega, t) \quad (2.6)$$

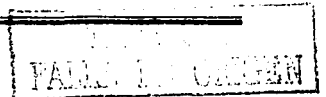
$$z(t) = c(t) \cdot \sum_{q=1}^N A(\omega_q, t) \cdot (V_q \cos(\omega_q t) + \omega_q \text{sen}(\omega_q t)) \quad ; \quad A(\omega_q, t) = \sqrt{2G(\omega, t)\Delta\omega} \quad (2.7)$$

También es posible simular el movimiento de cierto proceso  $z(t)$  considerando un proceso multidimensional de una o varias variables, en  $n$  dimensiones de forma similar al procedimiento presentado.

## 2.2 SIMULACIÓN DE MOVIMIENTOS SÍSMICOS CONSIDERANDO PARÁMETROS SISMOTECTÓNICOS

### 2.2.1 Modelo de Boore (1983)

Se han formulado modelos matemáticos para simular acelerogramas que toman en cuenta parámetros físicos de la fuente y del medio (magnitud, distancia, área de falla, momento sísmico,



etc), dentro de los cuales el propuesto por Boore (1983) es bastante operativo. Este propone expresar el espectro del movimiento del suelo, representado por el espectro de amplitudes de Fourier  $|S(\omega)|$ , como el producto de varias funciones dependientes de la frecuencia  $\omega$  como se muestra en la expresión (2.8) y luego generar series de tiempo de duración finita cuyo espectro sea igual, al menos en promedio, a un espectro teórico (modelo de fuente  $\omega^2$ ).

$$S(\omega) = C \cdot A_1(\omega) \cdot A_2(\omega) \cdot A_3(\omega) \quad (2.8)$$

Donde C es un parámetro de escalamiento que es función de la partición de la energía en componentes horizontales, del patrón de radiación de los efectos de superficie libre, de la densidad y velocidad de ondas de corte en el suelo en la fuente y de la distancia hipocentral. La función  $A_1(\omega)$  esta relacionada con características asociadas a la fuente como son el momento sísmico  $M_0$  y la frecuencia angular de esquina  $\omega_0$  (Aki (1967) y Brune (1970)). La función  $A_2(\omega)$  considera un factor de amplificación para tomar en cuenta que las ondas sísmicas viajan a través de los estratos y generalmente tienen velocidades diferentes durante su trayecto. La función  $A_3(\omega)$  es un factor de disminución asociado a la atenuación de las ondas. Estos parámetros corresponden uno a uno a los presentados en las expresiones 2.14 y 2.15 en la sección 2.2.2; además están explicados con mayor detalle en Boore (1983 y 2003).

Este modelo puede considerarse no estacionario si se incluyen funciones dependientes del tiempo como en la expresión (2.9).

$$S(\omega) = C \cdot A_1(\omega, \omega_0(t), M_0(t)) \cdot A_2(\omega) \cdot A_3(\omega) \quad (2.9)$$

Donde se supone que  $M_0(t)$  tiene forma trapezoidal que varía en el tiempo y la frecuencia  $\omega_0$  también depende del tiempo. Es posible generar funciones de densidad espectral de potencia para el modelo estacionario o no estacionario como en las expresiones 2.10 y 2.11 respectivamente, donde  $T_r$  representa la duración de la ruptura de la falla que origina el evento sísmico.

$$G(\omega) = S(\omega)^2 \cdot (\pi \cdot T_r) \quad (2.10)$$

$$G(\omega, t) = S(\omega, t)^2 \cdot (\pi \cdot T_r) \quad (2.11)$$

Finalmente a partir de estas últimas expresiones, es posible generar acelerogramas simulados siguiendo los lineamientos especificados en la sección 2.1.

## 2.2.2 Modelo teórico de fuente $\omega^2$

El objetivo del modelo es generar series de tiempo transitorias cuyos espectros de amplitudes guarden al menos en promedio, semejanza, con un espectro de amplitudes teórico, construido con consideraciones físicas. Adoptando el modelo de fuente de Brune (1970) modificado para considerar la atenuación de altas frecuencias y obtener representación del espectro de amplitudes en el dominio del tiempo. El método solo considera ondas S sin embargo, este se adaptó para sintetizar acelerogramas que tomen en cuenta la presencia de ondas P.

El método usa dos series de tiempo de ruido blanco gaussiano moduladas con una ventana temporal (ver expresión 2.12), la cual da una buena representación del envolvente promedio de las series de tiempo de aceleraciones cuadráticas.

$$W(t) = H(t) \cdot a \cdot t^b \cdot e^{-ct} \quad (2.12)$$

Donde  $H(t)$  es la función de escalón unitario. El parámetro  $a$  depende de la duración asociada a la emisión de ondas P Y S ( $T_P$  y  $T_S$  respectivamente).

Se definen los parámetros  $b$  y  $c$  de forma que el máximo de la envolvente ocurra en alguna fracción  $\varepsilon$  de la duración  $T$  especificada y la amplitud al tiempo  $T$  se reduzca a la fracción  $\eta$  de la máxima amplitud (ver expresión 2.13).

$$b = \frac{-\varepsilon \cdot \ln \eta}{[1 + \varepsilon(\ln \varepsilon - 1)]} \quad ; \quad c = \frac{b}{\varepsilon T} \quad (2.13)$$

El modelo considera que los espectros de Fourier  $G_S(\omega)$  y  $G_P(\omega)$  de estas series se multiplican por formas espectrales que serán función del tamaño de la fuente sísmica y reflejan las características principales de ruptura y propagación. Las formas espectrales adoptadas, para representar los espectros de aceleraciones a una distancia  $R$  de una falla con momento sísmico  $M_0$  están dadas por las expresiones (2.14) y (2.15).

$$A_P(\omega) = C_P M_0 S_P(\omega, \omega_c^P) P_P(\omega, k_P) \cdot \frac{e^{-\omega R / 2 Q_P \alpha}}{R} \quad (2.14)$$

$$A_S(\omega) = C_S S_S M_0 (\omega, \omega_c^S) P_S(\omega, k_S) \cdot \frac{e^{-\omega R / 2 Q_S \beta}}{R} \quad (2.15)$$

Donde  $C_P$  y  $C_S$  son constantes que dependen de los patrones de irradiación, de un factor de superficie libre y de factores de reducción que toman en cuenta la partición de la energía en dos componentes horizontales, además son función de la densidad de masa  $\rho$  y de los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  que representan las velocidades de propagación de las ondas P y S respectivamente.

El espectro de fuente  $S_S(\omega, \omega_c^S)$  según Aki (1967) y Brune (1970) está dado por:

$$S_S(\omega, \omega_c^S) = \frac{\omega^2}{1 + (\omega / \omega_c^S)^2} \quad (2.16)$$

De forma similar para las ondas P se tiene que:

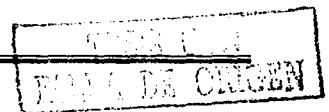
$$S_P(\omega, \omega_c^P) = \frac{\omega^2}{1 + (\omega / \omega_c^P)^2} \quad (2.17)$$

Donde Los términos  $P_P(\omega, k_P)$  y  $P_S(\omega, k_P)$  son filtros pasa - bajas que toman en cuenta la reducción de las amplitudes de altas frecuencias debidas a los efectos de sitio. Por último,  $Q_P$  y  $Q_S$  son los factores de calidad y controlan la atenuación durante el trayecto. La frecuencia de esquina  $f_c = \omega_c^S / 2\pi$  está dada por la expresión (2.18) de Brune (1970, 1971); donde  $f_c$  está en Hz,  $\beta$  es la velocidad de las ondas de cortante S en km/s,  $M_0$  en dinas - cm y  $\Delta\sigma$  en bar.

$$f_c = 4.9 \times 10^6 (2\pi\beta)(\Delta\sigma / M_0)^{1/2} \quad (2.18)$$

El momento sísmico  $M_0$ , lo obtenemos de la expresión de Hanks y Kanamori (1979) en términos de la magnitud  $M_w$  del sismo como se muestra en la expresión 2.19.

$$M_w = \frac{2}{3} \cdot \log M_0 - 10.7 \quad (2.19)$$





La duración  $T_S$  requerida para construir la envolvente para el campo de ondas S, dada por la ecuación de  $W(t)$  se hace igual a la duración de la ruptura  $T_d$ , y se puede considerar la duración para las ondas P de forma similar (ver expresiones 2.20 y 2.21).

$$T_S = T_d = \frac{1}{f_c^S} \quad (2.20)$$

$$T_P = T_d = \frac{1}{f_c^P} \quad (2.21)$$

Finalmente, considerando la diferencia de tiempo entre el arribo de las ondas P y las ondas S,  $t_{s-p} = R\alpha\beta/(\alpha-\beta)$ , el acelerograma se obtiene haciendo uso de la síntesis de Fourier, de acuerdo a la expresión (2.22), en la cual  $F^{-1}$  representa la transformada inversa de Fourier, y además  $G_S(\omega)$  y  $G_P(\omega)$  son los espectros de Fourier de las series de Ruido blanco para las ondas P y S, respectivamente.

$$a(t) = F^{-1} \left[ A_P(\omega) \cdot G_P(\omega) + A_S(\omega) \cdot G_S(\omega) \cdot e^{-i\omega t_{s-p}} \right] \quad (2.22)$$

### 2.2.3 Modelado matemático a partir de funciones de Green empíricas

#### Método de Irikura

Para incorporar los efectos de propagación de ondas a través de la estructura heterogénea de la corteza terrestre, así como los efectos de sitio, este método considera eventos sísmicos pequeños que se suponen ubicados en la misma área de falla que el movimiento postulado para ser simulado. Los aspectos generales de los procesos de ruptura de la fuente sísmica se predicen con base en una ley de escalamiento de los espectros de fuente, como es la presentada por el modelo de escalamiento  $\omega^2$  que describe adecuadamente el espectro de aceleraciones. El modelo considera las hipótesis dadas por las expresiones (2.23), donde  $\bar{a}_0$  y  $\bar{a}_\infty$  son los niveles planos del espectro de desplazamientos a bajas frecuencias, mientras que  $\bar{A}_0$  y  $\bar{A}_\infty$  representan el nivel plano de los espectros en altas frecuencias. Finalmente  $M_0$  y  $M_{0e}$  son los momentos sísmicos para el evento grande y para el pequeño que será la función de Green empírica, respectivamente.

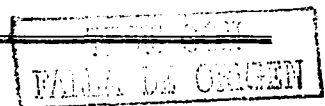
$$\frac{\bar{C}_0}{\bar{a}_0} = \frac{M_0}{M_{0e}} = N^3 \quad ; \quad \frac{\bar{A}_0}{\bar{a}_0} = \left[ \frac{M_0}{M_{0e}} \right]^{1/3} = N \quad (2.23)$$

El método está dado por Irikura (1986) e Irikura y Aki (1988), y consiste en sumar pequeños eventos satisfaciendo las restricciones mencionadas. Usualmente el modelo sintético se considera como falla homogénea en donde los parámetros de la fuente, como la velocidad de ruptura y el tiempo de ascenso, permanecen constantes para cada elemento a lo largo y ancho de la falla. Irikura (1988) sugiere cómo extender este método para un modelo de falla heterogéneo.

Para el modelo, el acelerograma sintético  $U(t)$  para el evento grande a partir del subevento  $u(t)$  se obtiene a partir de las expresiones (2.24) y (2.25).

$$U(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N [r/r_{ij}] \cdot F_{ij} \cdot u(t) \quad (2.24)$$

$$F_{ij}(t) = \delta(t - t_{ij}) + \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{(N-1)n} \delta \cdot \left[ \frac{t - t_{ij} - (k-1)r_{ij}}{(N-1)n} \right] \quad (2.25)$$



Donde  $\tau_{ij}$  (tiempo de ascenso del pequeño evento) es una variable aleatoria que varía entre 0 y  $T$ , siendo  $T$  el tiempo de ruptura del gran evento; esto no es más que un corrimiento en el tiempo al cual se atribuye el inicio de la ruptura del  $i$ -ésimo subevento, permitiendo de este modo una propagación de la ruptura con irregularidades. La integración de  $F_{ij}(t)$  con respecto al tiempo corresponde al desplazamiento de cada elemento en el cual está dividida el área de falla. El parámetro  $n$  es un número entero apropiado para desplazar la periodicidad ficticia  $\tau_{ij}/(N-1)$  hacia altas frecuencias, fuera del intervalo de interés (Irikura (1983)). Para elegir adecuadamente las variables que intervienen en la simulación, se recurre a las leyes de similitud derivadas por Kanamori (1975) y Geller (1976) que establecen, que para sismos de diferente magnitud ocurridos en la misma región, se cumple:

$$N = \frac{L}{L_e} = \frac{W}{W_e} = \frac{D}{D_e} = \frac{\tau}{\tau_e} = \left[ \frac{M_o}{M_{oe}} \right]^{1/3} \quad (2.26)$$

Donde  $L$  y  $W$  son las dimensiones ortogonales del plano de falla,  $D$  es el deslizamiento sobre este plano,  $\tau$  es el tiempo de ascenso,  $M_o$  es el momento sísmico y  $e$  el subíndice que denota al subevento. Estas expresiones lo que muestran es que la relación entre los momentos sísmicos de los eventos (grande y pequeño) dependen del cociente de sus áreas y los tiempos de ascenso. Esto permite decir que un temblor grande será sintetizado a partir de uno pequeño si su plano de falla se subdivide en  $N \times N$  subfallas iguales a la del temblor pequeño, es decir: se suponen un número  $N$  de pequeños eventos dispuestos en el área de falla del sismo postulado.

Este modelo requiere entonces de los siguientes parámetros: localización del epicentro, momentos sísmicos y mecanismos focales (rumbo, echado, ángulo de deslizamiento) de ambos eventos. Parámetros como el área de ruptura  $A$  pueden obtenerse considerando que:

$$M_s \approx \log A + 4 \quad (2.27)$$

O adicionalmente, el área de falla se puede obtener utilizando el modelo de Brune (1970) conociendo previamente la frecuencia de esquina. Un parámetro difícil de estimar es el tiempo de ascenso del subevento. Podemos observar estos tiempos para la zona de subducción de México, en algunas gráficas presentadas por Singh y Mortera (1990), sin embargo puede realizarse una estimación a partir de la relación de Abe(1975) dada por la expresión (2.28).

$$\tau = \frac{16 \cdot A^{1/2}}{7 \cdot \pi^{3/2} \cdot \beta} \quad (2.28)$$

El último parámetro se refiere a la velocidad de ruptura, para lo cual se han determinado valores entre 0.7 y 0.9 de la velocidad de las ondas  $S$ , que para la costa del Pacífico mexicano se ha aceptado igual a 3.5 km/s.

### Método de Joyner y Boore

Este modelo maneja el mismo concepto de utilizar pequeños eventos como funciones de Green empíricas, considerando el escalamiento espectral  $\omega^2$  a partir del cual y considerando las condiciones de similitud aplicadas a los momentos sísmicos, Kanamori (1975) y Geller (1976), se obtienen dos variables  $\eta$  y  $\nu$  como sigue:

$$\eta = [M_o / M_{oe}]^{4/3} \quad \nu = [M_o / M_{oe}]^{-1/3} \quad (2.29)$$

Donde  $M_0$  y  $M_{0e}$  representan los momentos sísmicos para el evento postulado y el pequeño evento que se utilizará como función empírica de Green, respectivamente. Las variables  $\eta$  y  $\nu$  indican el número de subeventos a sumar y la amplitud que deben tener para que se cumpla que el sismo tenga un momento sísmico  $M_0$  y se escale con el subevento de acuerdo con el modelo omega cuadrada  $\omega^2$  definido en el numeral 2.2.2. Adicionalmente el modelo involucra la variable aleatoria  $\tau$ , definida en el numeral 2.2.3. En este método no es posible controlar todos los parámetros de la fuente a simular y la colección de simulaciones únicamente dependerá de la semilla con que se genere el número aleatorio.

#### **Método de Ordaz y otros (1995)**

La estimación de futuros movimientos del suelo para terremotos postulados de magnitud  $M$  conocida es un problema relevante tanto para sismólogos como para ingenieros sísmicos. Los cálculos teóricos pueden producir registros en el tiempo no tan confiables, especialmente para altas frecuencias, debido a que los efectos locales son muy poco conocidos. Una alternativa propuesta por Hartzell (1978) es usar los registros de pequeños sismos como funciones empíricas de Green, los cuales a su vez incluyen la propagación y los efectos de sitio, eliminando así la incertidumbre que se refiere a la estructura y a las condiciones geológicas del sitio.

Diferentes procedimientos, tanto teóricos como empíricos, han sido propuestos en la utilización de funciones de Green para un sismo postulado y en algunos casos se requiere una descripción detallada de los procesos de ruptura y de aquí la necesidad de especificar ciertos parámetros como son la caída de esfuerzos  $\Delta\sigma$  y el momento sísmico  $M_0$  de los cuales se sabe muy poco.

Propuestas como las de Joyner y Boore (1986), en la que se asume una distribución uniforme del tiempo en los procesos de ruptura durante sismos representativos, en nuestro caso el postulado, producen sismogramas que no son tan reales. Wennerberg (1990) modifica la propuesta de Joyner y Boore eligiendo una función de distribución de probabilidad del tiempo durante los procesos de ruptura que evite las discontinuidades obtenidas para una distribución uniforme en el espectro del evento postulado, lo cual permite obtener acelerograma más reales. Ambas propuestas requieren un escalamiento respecto a  $\omega^2$ . Ordaz, Arboleda y Singh (1995), presentan un modelo para sintetizar movimientos del suelo para sismos postulados representativos, el cual también obedece al escalamiento en  $\omega^2$  para todas las frecuencias y produce acelerogramas cuya envolvente es bastante próxima a la real. El método supone que se conocen los parámetros que representan el proceso de ruptura ( $\Delta\sigma$  y  $M_0$ ) y que el área de ruptura es aproximada como una fuente puntual, cuya duración esta de acuerdo con su dimensión.

El método considera que  $a_s(t)$  es el registro de un evento pequeño obtenido en el sitio de interés y que  $M_{0s}$  y  $\omega_{cs}$  son el momento sísmico y la frecuencia de esquina de este evento. El objetivo es sintetizar movimientos del suelo esperados en el mismo sitio para un terremoto postulado con momento sísmico  $M_{0e}$  y frecuencia angular  $\omega_{ce}$  el cual ocurre en la misma región del pequeño evento y tienen el mismo mecanismo focal.

Lo que se pretende es a partir de un procedimiento de suma de  $a_s(t)$  sintetizar el movimiento del suelo del evento postulado,  $a_e(t)$ , que estará conforme a la ley de escalamiento de  $\omega^2$  en la banda de interés de frecuencias. Aunque no es estrictamente verdad se supone el registro del pequeño evento como la función de Green para todos los puntos del área de ruptura del sismo postulado. Para el caso es posible determinar el parámetro de caída de esfuerzos  $\Delta\sigma$ , que está relacionado con  $\omega_{ce}$ , por medio de la expresión dada en el modelo propuesto por Brune (1970), de la expresión (2.18). El procedimiento considera que los espectros de amplitudes de Fourier del evento esperado y del evento pequeño se relacionan como sigue:

$$A_e(\omega) = \xi A_s(\omega) \sum_{j=1}^N e^{-i\omega t_j} \quad (2.30)$$

Además si consideramos que los tiempos en que se desfasan las señales son aleatorios, independientes e igualmente distribuidos con una función de densidad de probabilidad  $p(t)$  (ver expresión 2.31), el valor esperado del espectro de amplitudes de Fourier del evento objetivo estará dado por la expresión 2.32 donde  $P(\omega)$  es la transformada de Fourier de  $p(t)$ .

$$p(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1 + a(\omega \omega_{ce})^2}{1 + (\omega \omega_{ce})^2} e^{i\omega t} d\omega \quad ; \quad a = \frac{2\omega_{ce}^2}{\omega_{ce}^2 + \omega_{cs}^2} \quad (2.31)$$

$$E[A_e(\omega)^2] = \xi^2 A_s(\omega)^2 [N + (N^2 - N)P(\omega)^2] \quad (2.32)$$

Finalmente se establecen las expresiones para  $\xi$  y  $N$  (expresiones 2.33 y 2.34), resolviendo un sistema de dos ecuaciones y dos incógnitas, que resultan de igualar los límites de alta y baja frecuencia, de una función analítica que se obtiene a partir del valor esperado del espectro de amplitudes de Fourier, con los límites que se obtienen a partir de un cociente espectral caracterizado de acuerdo al modelo omega cuadrada  $\omega^2$ .

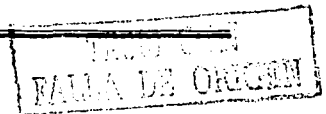
$$\xi = \left( \frac{M_{ce}}{M_{cs}} \right)^{-1/3} \left( \frac{\Delta\sigma_e}{\Delta\sigma_s} \right)^{4/3} \quad (2.33)$$

$$N = \left( \frac{M_{ce}}{M_{cs}} \right)^{4/3} \left( \frac{\Delta\sigma_e}{\Delta\sigma_s} \right)^{-4/3} \quad (2.34)$$

lo que finalmente se plantea es un esquema de suma de funciones empíricas de Green que en promedio y para todas las frecuencias, genere temblores con un contenido espectral congruente con el modelo de escalamiento  $\omega^2$ .

Existen otros trabajos que plantean el uso de funciones de Green para la obtención de acelerogramas sintéticos, entre los cuales podemos citar:

- Aguirre (2001) presenta un método de inversión que es una combinación del método de las funciones de Green empíricas (Irikura 1986) y de algoritmos genéticos. Esta versión modificada del método de funciones de Green (Irikura, 1986) considera las dislocaciones y los tiempos de perturbación, así como leyes de escalamiento que relacionan el número de eventos  $N$  de magnitud  $m_0$  requeridas para simular un sismo mayor de magnitud  $M_0$ , además de un factor  $C$  que relaciona la diferencia entre la caída de esfuerzos del sismo pequeño respecto al sismo grande. Por medio de este método es posible detectar dislocaciones y disminuciones en las velocidades de ruptura, lo que sugiere la existencia de asperezas en la subfalla en donde esto ocurre y permite estudiar y evaluar el riesgo sísmico existente en una zona determinada; este modelo presenta una herramienta Adicional en el estudio de los procesos de fuentes sísmicas.
- Hadley y Helemerger (1980) proponen una técnica de simulación de movimientos fuertes del suelo para distancias epicentrales pequeñas ( $\Delta = 10$  a  $25$  km), se emplean acelerogramas registrados por seis estaciones en el sur de California. El procedimiento consiste en superponer sismos de magnitud más pequeña que el sismo a simular, considerando que cada área en el grid del plano de falla debe ser coherente con el área de falla asociado al registro observado y utilizado como función de Green durante la simulación; además se considera el acelerograma observado con distancia hipocentral más similar al elemento para ser usado en la superposición.



- Masahiro Iida presenta un análisis tridimensional interacción suelo – estructura de varios tipos de edificios altos y bajos durante un sismo postulado en Guerrero, para tratar de entender la causa real del gran daño que sufrieron las construcciones de mediana altura durante el sismo de Michoacán de 1985. La metodología consistió en modelar el comportamiento suelo–estructura por medio de un análisis sísmico no–lineal basado en elementos finitos, desarrollado por Ishihara y Miura, considerando que la superestructura descansa sobre una fundación rígida soportada sobre pilotes, los cuales se modelan como elementos viga y el volumen de suelo se representa en base a elementos prismáticos tridimensionales. Para obtener el sismo postulado, se usa un método de superposición semi – empírico de funciones de Green que considera una distribución no uniforme del momento sísmico en el área de falla y una velocidad de ruptura constante

### 2.3 SIMULACIÓN DEL MOVIMIENTO DEL SUELO EN UN SITIO, PARA UNA INTENSIDAD DADA Y UNA LOCALIZACIÓN DEL ORIGEN DESCONOCIDA (MODELO DE ALAMILLA Y OTROS, 2001).

Para obtener acelerogramas sintéticos sobre roca de las componentes horizontal y vertical del movimiento del terreno, se considera éste como una realización de un proceso estocástico gaussiano no estacionario, con parámetros estadísticos dependientes de la magnitud y la distancia al sitio. Estos parámetros se relacionan con magnitud y distancia por medio de funciones semi-empíricas llamadas *funciones de atenuación generalizadas*, las cuales modulan las frecuencias y amplitudes del movimiento. El conjunto de historias detalladas del movimiento del terreno empleadas para obtener dichas funciones corresponden a movimientos generados en diversas fuentes sísmicas de la costa sur del Pacífico de México y registrados en diferentes sitios en la vecindad de la costa.

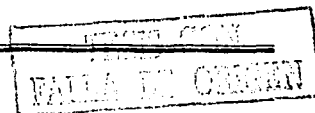
Este método tiene la ventaja de ser aplicable a cualquier combinación de parámetros de fuente que se requiera; sin embargo, para definir las propiedades estadísticas de los parámetros que controlan el movimiento se requiere de una muestra de acelerogramas registrados en el sitio de interés. Los registros de aceleraciones para un movimiento del suelo durante un sismo pueden ser descritos como producto de procesos no estacionarios estocásticos con contenidos de frecuencias variables e intensidades instantáneas (Yeh y Wen, 1989) como se muestra en la expresión 2.30.

$$\xi(r) = I(r)\zeta(\varphi(r)) \quad (2.30)$$

Donde  $\xi(t)$  es la aceleración del suelo como una función del tiempo;  $I(t)$  es una función de modulación de la amplitud;  $\varphi(t)$  es una transformación de la escala en el tiempo para poder modular las frecuencias y  $\zeta(\varphi(t))$  es un ruido blanco gaussiano filtrado y estacionario respecto a  $\varphi$ .

Los parámetros que caracterizan estos procesos y que permiten modular la frecuencia y la amplitud son tomados como variables desconocidas cuya distribución probabilística depende de la magnitud  $M$  de cada evento sísmico y la correspondiente distancia  $R$  al sitio de origen, los autores estudian estos parámetros para un grupo de registros de aceleraciones sobre terreno firme cerca de la costa de México. Se elige representar los parámetros como una función de la magnitud y la distancia al sitio de origen pues ello permite tener un mejor control sobre las características del sismo que están más directamente relacionadas con la respuesta esperada de las estructuras.

En problemas prácticos, los sismos que determinan el riesgo sísmico en un sitio dado pueden obtenerse considerando diferentes orígenes, con diferente localización espacial con respecto al sitio de ocurrencia así como para diferentes magnitudes; que involucra el valor más adecuado para la magnitud y la distancia condicionado a un valor dado de la intensidad (McGuire (1995)). El procedimiento presentado por Alamilla y otros, es más general y permite tratar explícitamente con funciones de distribución que dependen de la magnitud y distancia condicionadas a los diferentes valores de intensidad.



Dos opciones para la simulación condicional de registros de aceleraciones para movimientos del suelo plantean J. Alamilla y otros (2001): La más detallada considera toda la información acerca de la distribución condicional de la magnitud y la distancia para propósitos de simulación de valores de los parámetros estadísticos. La segunda opción considera todas las probabilidades en la combinación mas adecuada de magnitud y distancia para cada origen sísmico que contribuye significativamente en el riesgo sísmico del sitio de interés.

Entre las limitaciones del método tenemos: considerando que las ordenadas del espectro de respuesta de riesgo uniforme reflejan las contribuciones de diferentes orígenes sísmicos en la vecindad del sitio en estudio y que las formas espectrales y las intensidades están asociadas a la variación de la magnitud y las distancias al origen, lo que se entiende como que no existe independencia entre los periodos naturales de los sistemas a ser diseñados, es decir: para un sismo dado los valores relativos de las contribuciones de los altos modos de vibración para la respuesta, son comparados con el modo fundamental, dirigiendo de los correspondientes al espectro de respuesta de riesgo uniforme. El modelo desprecia este hecho, no estudia su significado práctico.

La simulación de acelerogramas para valores dados de la magnitud y la distancia se hace en dos pasos: en el primero, se incluye la simulación de grupos de parámetros asociados al modelo estocástico. En el segundo, se obtienen los registros individuales a partir de esos parámetros. Finalmente si la intensidad de cada registro simulado difiere del valor elegido, se requiere la introducción de un factor de escala  $\epsilon$ , el cual considera la desviación de las intensidades con respecto a los valores esperados para los parámetros dados.

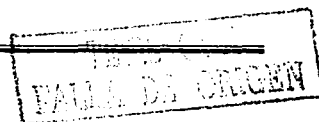
#### 2.4 EXPRESIÓN EMPÍRICA DE GUERRERO DEL ANGEL Y OTROS (1997)

Guerrero del Angel y otros (1997) propone un modelo que provoca un daño máximo global en una estructura del mismo orden que el originado por un acelerograma completo y uno recortado el cual incluye las máximas amplitudes de la aceleración para el registro completo. Para emplear este modelo se requiere conocer previamente la aceleración máxima del terreno  $A_{MAX}$  que es función de las características de sitio y del sismo, el periodo dominante del terreno  $T_1$  y la duración del acelerograma. El modelo consiste en una expresión para simplificar el movimiento en la zona de lago del valle de México así:

$$A_s(t) = A_{m\acute{a}x} \cdot \text{sen} \left[ \frac{2\pi}{T_1} t \right] \cdot \text{sen} \left[ \frac{2\pi}{T_2} t \right] \quad (2.31)$$

Donde  $A_s(t)$  es la aceleración de terreno en el tiempo  $t$  y  $T_2$  es igual a dos veces la duración del movimiento. El modelo consta de una función principal senoidal que contiene el periodo dominante del suelo y cuya amplitud es regulada por otra función del mismo tipo, con periodo  $T_2$ , cuyo valor controla la duración del movimiento; el valor de  $T_2 / 2$  se estima como la duración para la cual se presentan las máximas demandas durante el movimiento sísmico y dependerá de los registros que hayan sido observados en el sitio.

Se recomienda que la duración que se considere para el modelo sintético sea tal que el crecimiento de las amplitudes se dé gradualmente hasta alcanzar la máxima aceleración, esto se debe cumplir de igual manera para el decremento de amplitudes después del pico de aceleraciones. Para que las condiciones finales e iniciales del modelo sean nulas (aceleración nula) la duración debe ser un múltiplo del periodo dominante. Los autores calibran el modelo con los parámetros obtenidos del registro de la estación SCT para el sismo del 19 de Septiembre de 1985: aceleración máxima del terreno  $A_{MAX} = 168$  gales y el periodo dominante del terreno  $T_1 = 2$  segundos. La Figura 2.1 muestra el modelo y los parámetros que intervienen.



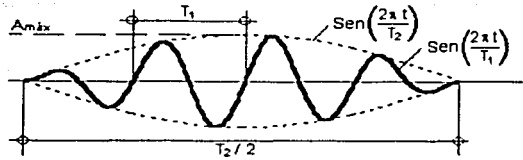


Figura 2.1 Modelo de Acelerograma sintético de Guerrero del Ángel (1997).

## 2.5 EXPRESIÓN EMPÍRICA DE HUERTA GÁRNICA (2001)

Huerta Gárnica propone un modelo para la estimación de acelerogramas sintéticos en el Valle de México basado en la propuesta de Guerrero del Ángel (1997), involucra parámetros como la aceleración máxima del terreno  $A_{MAX}$ , el período dominante del terreno  $T_S$  y la duración de la fase intensa del movimiento  $T_d$  que puede ser tomada como una fracción de la duración total del movimiento. El modelo se muestra a continuación en la expresión 2.32.

$$A_s(t) = A_{\text{máx}} \cdot \frac{90t^2(t - T_d)^6}{T_d^8} \cdot \cos\left[\frac{2\pi(t - T_d)}{T_S}\right] \quad (2.32)$$

Para la determinación de parámetros como la aceleración máxima se puede recurrir a expresiones sencillas que se indican en la literatura o simplemente la ordenada del origen del espectro de diseño. De otro lado  $T_S$  puede obtenerse del Reglamento que contiene mapas de período dominante del terreno. Para  $T_d$  se puede recurrir a trabajos como el de Reinoso y Ordaz (2001) que predicen la duración del movimiento del terreno en el Valle de México a partir de expresiones muy simples.

La diferencia entre los modelos de Guerrero y Huerta radica en que el segundo tiene una variación en amplitud que se asemeja mas a un movimiento real, presentando su valor máximo a un cuarto de la duración y a partir de allí la amplitud decrece uniformemente originando una mayor duración, ver la Figura 2.2.

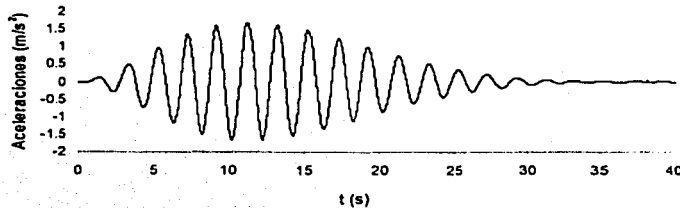


Figura 2.2 Acelerograma sintético obtenido para el sismo del 19 de septiembre de 1985, Modelo Huerta (componente EW).

## CAPITULO III

## ESTIMACIÓN DE LA RESPUESTA DEL MOVIMIENTO DEL SUELO PARA EVENTOS FUTUROS UTILIZANDO DIFERENTES MODELOS

## 3.1 PARÁMETROS EMPLEADOS PARA EL MÉTODO DE LAS FUNCIONES EMPÍRICAS DE GREEN

El método de las Funciones Empíricas de Green escala registros sísmicos de magnitudes pequeñas hasta obtener el registro para un sismo postulado de magnitud  $M$ . La utilización de pequeños sismos como funciones de Green elimina la incertidumbre que se refiere a la estructura y a las condiciones geológicas del sitio pero implica tener una descripción más clara en los procesos de ruptura y de aquí la necesidad de especificar parámetros como la caída de esfuerzos  $\Delta\sigma$  y el momento sísmico  $M_0$  que durante muchos años han sido investigados.

En las tablas 3.1 y 3.2 se presenta un resumen de la información que diferentes investigadores han publicado acerca de las caídas de esfuerzos y los momentos sísmicos para eventos tanto de subducción como de falla normal; además se indican los resultados obtenidos utilizando la expresión de H. Kanamori (1979) que relaciona la magnitud momento  $M_w$  y el momento sísmico  $M_0$  y algunos valores de momentos sísmicos registrados en el CMT Catalog Search (Harvard Seismology). En la última columna de estas tablas se indican las caídas de esfuerzos  $\Delta\sigma$  reportadas para algunos de los eventos.

En estas tablas, en el caso de no disponer de la magnitud momento  $M_w$ , por que no se conocía o fue reportada otra escala de magnitudes, para el evento sísmico se empleará el valor de su magnitud  $M_s$  en la expresión de Kanamori, esto considerando que para valores de  $M_s$  menores a 8.0, es decir bajo el límite de saturación de  $M_s$ , ambas escalas de magnitud son muy similares. Es importante también tener claro que la magnitud momento  $M_w$  tiene una transición suave con la escala de magnitud de ondas de superficie  $M_s$  y se puede considerar como una escala de transición adecuada para magnitudes mayores que 7.5.

En las figuras 3.1 y 3.2 se muestra cómo varía la magnitud momento a medida que se incrementa el momento sísmico, se presentan los diferentes valores reportados para el momento sísmico por CMT Harvard y diferentes investigadores y se presenta el ajuste que corresponde a la expresión de Kanamori empleada para obtener el momento sísmico  $M_0$  considerando separadamente los dos mecanismos de falla (subducción y normal). En estas figuras cada punto representa un evento asociado a la información encontrada.

De las Figuras 3.1 y 3.2 se puede decir:

- La expresión de H. Kanamori (1977) es muy simple para determinar parámetros como el momento sísmico  $M_0$  a partir de información tan elemental como es la magnitud de un sismo cuando el objetivo es obtener acelerogramas sintéticos considerando el método de las funciones de Green. Además es de tener en cuenta que a pesar de no conocer la magnitud momento se puede recurrir a utilizar otro tipo de escalas de magnitud obteniendo resultados coherentes.
- Tanto para los sismos de subducción como para los de falla normal que se presentan en la Costa del Pacífico de México y hacia el interior del país respectivamente, los datos reportados del CMT Harvard y de las diferentes referencias presentan muy poca dispersión respecto a la curva logarítmica que describe la expresión de Kanamori (seguramente fueron calculados empleando esta expresión lo cual en algunos casos no se especifica); esta define en forma adecuada la variación del momento sísmico  $M_0$  respecto al incremento en la magnitud momento  $M_w$ .



- Para los sismos de falla normal, los reportados por los diferentes investigadores, cabe anotar que son muy pocos los eventos de este tipo registrados y que la magnitud máxima encontrada para la cual había información sobre el momento sísmico  $M_0$  fue de  $M_w = 7.8$ .

Tabla 3.1 Momentos sísmicos y caldas de esfuerzos reportados para sismos de subducción.

Momentos sísmicos y caldas de esfuerzos reportados para sismos de subducción (dynas -cm)						
Fecha	$M_w$	$M_w$ Harvard	$M_0$ Referencias	$M_0$ Kanamori	$M_0$ Harvard	$\Delta\sigma$ (bars)
22/03/28	7.5	-	$1.79E+27^{(1)}$	$2.0E+27$	-	-
09/10/28	7.58	-	$2.35E+27^{(1)}$	$2.6E+27$	-	-
03/06/32	7.97	-	$9.1E+27^{(1)}$	$1.0E+28$	-	-
18/06/32	7.91	-	$7.3E+27^{(1)}$	$8.2E+27$	-	-
23/12/37	7.48	-	$1.63E+27^{(1)}$	$1.9E+27$	-	-
15/04/41	7.65	-	$2.94E+27^{(1)}$	$3.3E+27$	-	-
22/02/43	7.46	-	$1.56E+27^{(1)}$	$1.7E+27$	-	-
14/12/50	7.3	-	$8.9E+26^{(1)}$	$1.0E+27$	-	-
28/07/57	7.81	-	$5.13E+27^{(1)}$	$5.8E+27$	-	-
11/05/62	7.3	-	$9E+26^{(1)}$	$1.0E+27$	-	-
19/05/62	7.27	-	$8E+26^{(1)}$	$9.0E+26$	-	-
23/08/65	7.49	-	$1.7E+27^{(1)}$	$1.9E+27$	-	-
02/08/68	7.33	-	$7E+27^{(1)}$	$1.1E+27$	-	-
30/01/73	7.65	-	$3E+27^{(1)}$	$3.3E+27$	-	-
19/03/78	6.63	-	-	$9.99E+25$	$8.87E+25$	100 <sup>2</sup>
29/09/78	7.67	5.6	$3.2E+27^{(1)}$	$3.6E+27$	$3.2E+24$	-
14/03/79	7.62	7.4	$2.7E+27^{(1)}$	$3.0E+27$	$1.7E+27$	-
25/10/81	7.43	7.2	$1.4E+27^{(1)}$	$1.6E+27$	$7.0E+26$	-
07/06/82(I)	6.96	-	$2.7E+26^{(1)}$	$3.1E+26$	-	-
07/06/82(II)	6.93	6.9	$2.5E+26^{(1)}$	$2.8E+26$	$2.9E+26$	-
19/09/85(I)	7.85	-	-	$6.68E+27$	-	40 <sup>2</sup>
19/09/85(II)	8.05	8	$1.17E+28^{(4)}$	$1.3E+28$	$1.1E+29$	25 <sup>4</sup>
21/09/85	7.66	7.5	$3.12E+27^{(4)}$	$3.5E+27$	$2.5E+27$	45 <sup>4</sup>
30/04/86	6.99	6.9	$3E+26^{(1)}$	$3.4E+26$	$3.1E+26$	-
08/02/88	5.91	5.8	-	$8.22E+24$	$7.37E+24$	-
25/04/89	6.9	6.9	$2.4E+26^{(2)}$	$2.51E+26$	$2.39E+26$	150 <sup>3</sup>
02/05/89	5.2	5.5	$1.9E+24^{(3)}$	$7.08E+23$	$1.91E+24$	200 <sup>3</sup>
24/10/93	6.7	6.6	$1.2E+26^{(3)}$	$1.26E+26$	$1.01E+26$	10 <sup>3</sup>
06/11/93	4.5	-	$6E+22^{(3)}$	$6.31E+22$	-	10 <sup>3</sup>
10/12/94	6.4	6.4	$2.82E+25^{(5)}$	$4.47E+25$	$5.20E+25$	100 <sup>3</sup>

(1) Singh y otros, 1990. (2) Singh y otros, 1989. (3) Ordaz y otros, 1995. (4) Singh y otros, 1986 (5) Valdéz, 1995

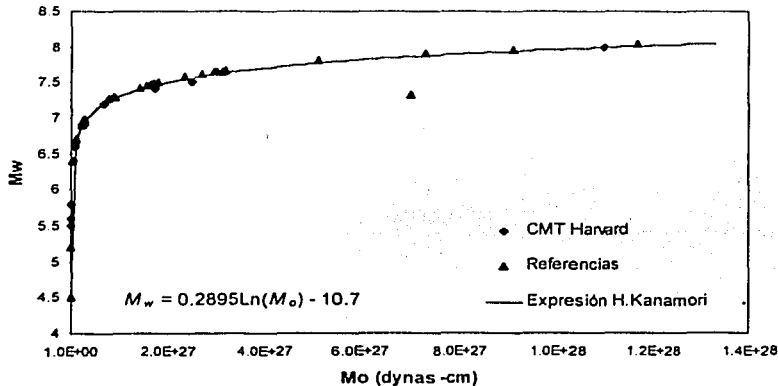


Figura 3.1 Curvas magnitud – momento sísmico para sismos de subducción.

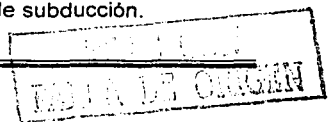


Tabla 3.2 Momentos sísmicos y caídas de esfuerzos reportados para sismos de falla normal.

Momentos sísmicos y caídas de esfuerzos reportados para sismos de falla normal (dynas - cm)						
Fecha	Mw	MwHarvard	MoReferencias	MoH Kanamon	Mo Harvard	Nc (bars)
09/03/1845	7.5	-	-	2.00E+27	-	215
19/06/1858	7.7	-	-	3.98E+27	-	-
03/10/1864	7.3	-	-	1.00E+27	-	-
16/03/1874	7.3	-	-	1.00E+27	-	-
17/05/1879	7	-	-	3.55E+26	-	-
26/03/08	7.8	-	-	5.62E+27	-	-
21/11/16	7	-	-	3.55E+26	-	-
10/02/28	6.5	-	-	6.31E+25	-	-
09/10/28	7.8	-	-	5.62E+27	-	-
17/06/28	8	-	-	1.12E+28	-	-
15/01/31	7.8 (Ms)	-	2.35E+27 <sup>(1)</sup>	5.62E+27	-	-
24/05/59	6.8	-	-	1.78E+26	-	-
06/07/64	7.3	-	1.15E+27 <sup>(2,3)</sup>	1.00E+27	-	256 <sup>(3)</sup>
28/08/73	7.3 (Mw)	-	4.1E+26 <sup>(1)</sup>	1.00E+27	-	-
24/10/80	6.3(mb), 7.1(Mw)	7.1	6.3E+26 <sup>(1,2,3)</sup>	5.01E+26	6.49E+26	145 <sup>(3)</sup>
15/08/87	5.9	-	2.6E+25 <sup>(1)</sup>	7.94E+24	-	-
17/08/87	5.3	-	-	1.00E+24	-	-
22/04/94	4.1(Mc)	-	6E+22 <sup>(2,3)</sup>	1.58E+22	-	12 <sup>(3)</sup>
25/07/91	5.7(Mw)	5.7	-	3.98E+24	3.76E+24	-
09/01/93	5.4(Mw)	5.4	-	1.41E+24	1.33E+24	-
06/05/94	4.9(M), 5.3(Mw)	5.3	1.1E+25 <sup>(2,3)</sup>	1.00E+24	9.39E+23	44 <sup>(2,3)</sup>
23/02/94	5.4(mb), 5.9(Mw)	5.8	-	5.62E+24	6.28E+24	-
23/05/94	5.7(Ms), 6.2(Mw)	6.2	2.8E+25 <sup>(2,3)</sup>	2.24E+25	2.72E+25	156, 160 <sup>(2,3)</sup>
21/10/95	7.2(Mw)	7.2	-	7.08E+26	7.07E+26	-
22/05/97	6.5(Mw)	6.5	-	6.31E+25	6.53E+25	-
20/04/98	5.9(Mw)	5.9	-	7.94E+24	1.01E+25	-
21/05/99	6.3(Mw)	6.3	-	3.16E+25	3.11E+25	-
15/06/99	6.9(Ms), 6.9(Mw)	6.9	-	2.51E+26	3.10E+26	-
30/09/99	7.5(Ms), 7.4(Mw)	7.4	-	1.41E+27	1.72E+27	-
21/07/00	5.1(Ms), 5.8(Mw)	5.8	6.00E+24	5.62E+24	7.14E+24	360

(1) Singh y otros, 1990. (2) Pacheco y otros, 1995. (3) Singh y otros, 1986

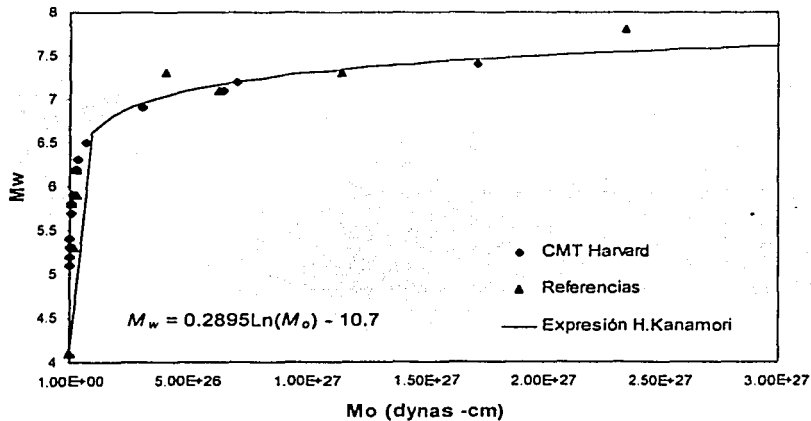


Figura 3.2 Curvas magnitud - momento sísmico para sismos de falla normal.

- Se puede ver que la curva de H. Kanamori representa valores intermedios de  $M_0$  entre los diferentes datos provenientes del CMT Harvard y los valores encontrados por diversos investigadores para una misma magnitud  $M_w$ , esto considerando sismos de falla normal; puede ser entonces conservador emplear valores de  $M_0$  mayores a los presentados por los diferentes investigadores y menores a los definidos por el CMT Harvard considerando que en este caso los valores se subestiman debido a que el modelo empleado para el último en general considera mayores profundidades por lo cual la velocidad de las ondas y la rigidez a este nivel son mayores y el momento sísmico  $M_0$  por lo tanto mayor. Para magnitudes momento superiores a 7 se puede ver que no son muchas las observaciones reportadas para este tipo de mecanismo, sin embargo la expresión de Kanamori sigue la tendencia de las diferentes observaciones y puede dar valores razonables del momento sísmico.
- Existe mayor información acerca de eventos de subducción respecto a eventos de falla normal, para magnitudes grandes, lo cual genera mayor incertidumbre para el segundo tipo de mecanismo en el último tramo de cualquier curva de regresión que pretenda relacionar la magnitud con el momento sísmico.

Podemos concluir inicialmente que suponer que los valores que nos da la expresión de H. Kanamori del momento sísmico  $M_0$  conociendo únicamente la magnitud del evento son razonables tanto en el caso de sismos de subducción como para sismos de falla normal teniendo en cuenta la gran incertidumbre que existe entre los investigadores acerca de este tipo de parámetros físicos que se emplean en diferentes mecanismos de fuente para definir el "tamaño" de un sismo.

Se emplearon los datos reportados por J. Humphrey and J. Anderson (1994), de caídas de esfuerzos y momentos sísmicos en la zona de subducción de Guerrero, a lo largo de la costa del Pacífico Mexicano, para buscar alguna relación que nos permitiera dar un valor coherente de caídas de esfuerzos a partir de la magnitud del evento sísmico o del momento sísmico conocido. La información presentada por los autores consta de 82 sismos de subducción y falla normal ocurridos entre 1985 y 1990 con magnitudes entre 3 y 7, agrupados en dos regiones adyacentes a la brecha de Guerrero: Petatlán y Acapulco. Las magnitudes indicadas en el documento se refieren a la Escala de Magnitudes Coda calculada por el Instituto de Ingeniería usando las estaciones de SISMEX.

Se identifican dos tipos de mecanismos de falla: el primero de subducción caracterizado por fuertes sismos en una franja de 35 km de ancho y con profundidades focales entre 10 km y 25 km en la costa del pacífico; el segundo de falla normal localizado hacia el interior de la primera banda en la costa Mexicana con profundidades entre 32 km y 42 km o hacia en interior del país con profundidades entre 40 km y 60 km. Este tipo de caracterización se considera para agrupar los diferentes eventos sísmicos de acuerdo a su mecanismo de falla y para intentar encontrar una distribución espacial de caídas de esfuerzos coherente respecto a la magnitud, profundidad, momentos sísmicos, entre otras. Además de considerar la ubicación espacial de los epicentros y la profundidad del foco para indicar el mecanismo de falla, se consideran las proyecciones estereográficas presentadas por el CMT Harvard para distintos eventos, esto consiste en una proyección de las zonas a compresión y de dilatación sobre un plano horizontal y es una representación del estado de esfuerzos en las zonas próximas a la falla.

A continuación en las Figuras 3.3 a 3.5 se intentan relacionar parámetros característicos de los eventos sísmicos como la magnitud, la profundidad, el momento sísmico y el mecanismo de falla con la caída de esfuerzos. En estas figuras se presenta el coeficiente de correlación  $R$ , que establece una medida del grado de asociación lineal entre el parámetro estudiado y la recta de regresión estimada tomando valores entre 0 y 1; mientras mas cerca este su valor de 1 mejor sera la regresión obtenida. En la Figura 3.3 se observa que no existe buena correlación entre la caída de esfuerzos y el momento sísmico para los diferentes eventos presentados por Anderson y otros (1994); existe gran dispersión tanto para los eventos de falla normal como para los de subducción, de igual forma se podrían graficar en conjunto todos los datos, independientemente del tipo de falla

o del número de estaciones por los que fueron registrados sin obtener una regresión representativa.

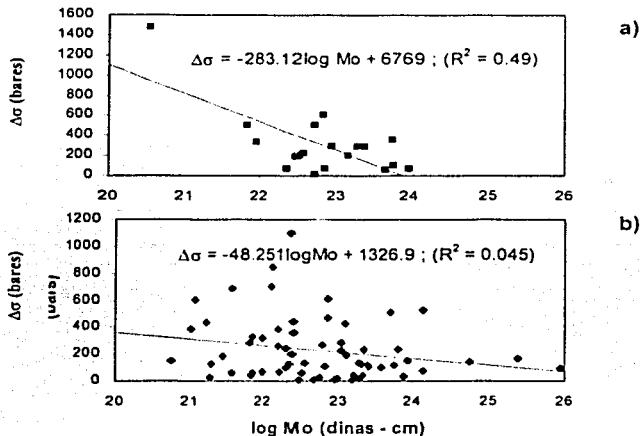


Figura 3.3 Regresión lineal de  $\Delta\sigma$  como función de  $M_o$  para los 82 eventos reportados por Humphrey y Anderson (1994) en a) sismos de falla normal y b) sismos de subducción.

Se puede decir entonces que los momentos sísmicos y las caídas de esfuerzos son esencialmente independientes, aunque la caída de esfuerzos tiende a decrecer a medida que el momento sísmico se incrementa para este rango de magnitudes; esto implica que es posible encontrar para un evento de magnitud  $M_w$  y momento sísmico  $M_o = f(M_w)$  varios valores probables de caídas de esfuerzos, o lo que es lo mismo, una banda de valores para  $\Delta\sigma$  correspondiente a un valor del momento sísmico. Una solución podría ser emplear un envolvente superior, por encima de la regresión lineal presentada en la Figura 3.3 para los dos tipos de falla, lo cual podría llevar a sobrestimar el valor de la caída de esfuerzos para un evento determinado.

Así mismo en las Figuras 3.3 y 3.4 se observa que no existe una buena correlación entre la caída de esfuerzos y los diferentes parámetros en estudio que allí se presentan; aunque la correlación para los sismos de falla normal es mas alta no hay gran confiabilidad debido a la escasez de información para este tipo de eventos lo cual se nota en la pobre densidad en la nube de puntos.

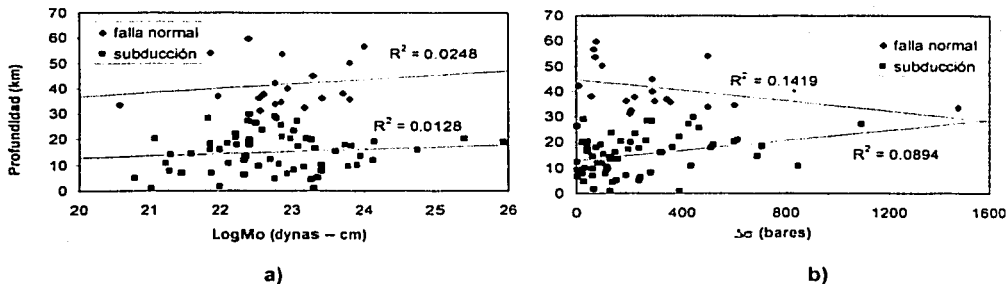


Figura 3.4 Variación de la profundidad focal para eventos de falla normal y de subducción respecto a) al momento sísmico y b) a la caída de esfuerzos.

Anderson y otros (1994) separaron la información por zonas, es decir: se agruparon los sismos de subducción que habían ocurrido en la región de Petatlán al noroeste de la brecha de Guerrero, y en la región de Acapulco al suroeste de la misma para buscar algún tipo de relación entre la caída de esfuerzos y el momento sísmico o entre la magnitud y la caída de esfuerzos como se muestra en la Figura 3.5. Los resultados fueron los mismos: no se encontró un comportamiento claro de la caída de esfuerzos respecto a los diferentes parámetros, solo se reconfirmó que la caída de esfuerzos se reduce conforme la magnitud aumenta y por lo tanto con el incremento en el momento sísmico.

En la región de Guerrero encontraron una caída de esfuerzos promedio de 150 bares y una distribución espacial característica de las mismas de acuerdo a la siguiente escala: altas caídas de esfuerzos ( $\Delta\sigma > 150$  bares), valores intermedios ( $50 < \Delta\sigma < 150$  bares) y bajas caídas de esfuerzos ( $\Delta\sigma < 50$  bares). Esta distribución de caídas de esfuerzos está definida espacialmente como sigue: en la zona activa de Petatlán se encontraron valores desde bajos hasta altos de  $\Delta\sigma$ , en la zona de Acapulco se encontraron valores superiores al promedio ( $\Delta\sigma = 150$  bares) y finalmente en la región hacia el interior donde se presentan los sismos de falla normal se registraron caídas de esfuerzos con valores intermedios y con profundidades mayores de 40 km (Humphrey And Anderson, 1994).

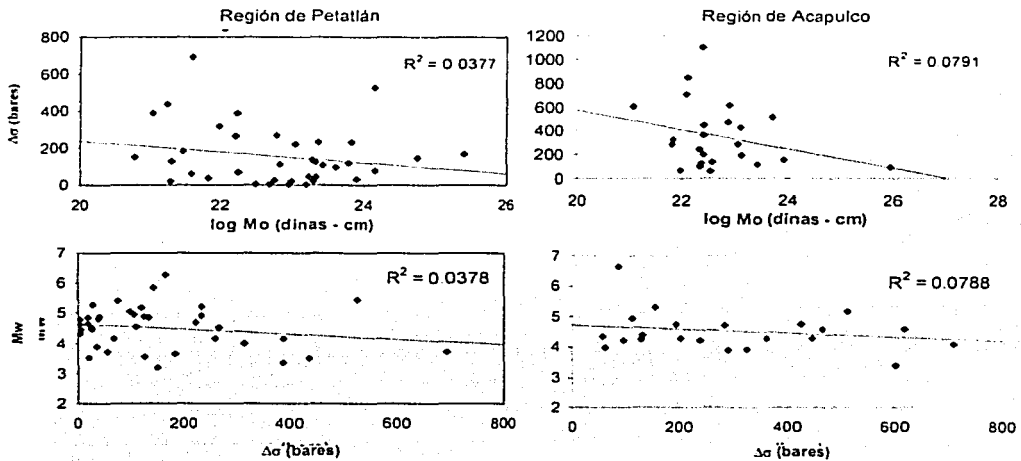


Figura 3.5 Variación de la caída de esfuerzos y de la magnitud momento para la región de Petatlán y Acapulco.

Finalmente es razonable suponer que el momento sísmico y las caídas de esfuerzos de la función de Green son conocidas. Debido a que la magnitud del evento postulado se conoce, el momento sísmico también será conocido y solo queda por determinar la caída de esfuerzos. Una alternativa a ello es tomar su valor igual a la del sismo utilizado como función de Green. Esto puede ser conservador ya que la evidencia sugiere que los parámetros de esfuerzos para sismos grandes son generalmente más pequeños que para sismos pequeños (Ordaz y otros, 1995). Se observa una tendencia a ser cada vez menos sensible la variación de la aceleración máxima conforme aumenta el valor de la caída de esfuerzos, por lo que respecta a las ordenadas espectrales máximas que se producen, la caída de esfuerzos seleccionada resulta poco relevante, esto da confianza acerca de la viabilidad del método de simulación a partir de las funciones de Green, ya que si por una parte existe gran incertidumbre en la elección del valor de la caída de esfuerzos, esta no aumenta de manera importante la incertidumbre en los resultados (González y Ramírez, 1995).

### 3.2 ESTIMACIÓN DE MOVIMIENTOS DEL SUELO PARA DIFERENTES MODELOS

Ahora presentamos algunos resultados obtenidos al evaluar diferentes modelos para la estimación de la respuesta del movimiento del suelo ante un sismo de magnitud  $M$ . Para obtener los acelerogramas y espectros de respuesta (aceleración y desplazamiento) se consideran los registros existentes para algunas de las estaciones de la Red Acelerométrica de México, de los cuales se pueden obtener parámetros como el período dominante del terreno  $T_S$  y la aceleración máxima registrada  $A_{MAX}$  que se emplearán en la evaluación de los modelos antes mencionados.

Se obtuvieron simulaciones tanto para sismos registrados en el valle de México como para movimientos en la Costa del Pacífico (Guerrero); los acelerogramas y algunos espectros de repuesta sintéticos obtenidos permiten evaluar qué tan precisos son los modelos empleados y en qué casos resultan ser más importantes, considerando las características, ventajas y desventajas, referidas en el Capítulo II. En las figuras 1.3 y 1.4 se marcan las estaciones cuyos registros se emplearon en los numerales presentados a continuación.

#### 3.2.1 Espectros de respuesta obtenidos a partir de las expresiones de Guerrero (1988) y Huerta (2001).

A continuación, para ilustrar el resultado que se obtiene con los acelerogramas sintéticos, en la Figura 3.6 se comparan los espectros de aceleración para el registro del 19 de septiembre de 1985 (estación SCT) con los obtenidos para las expresiones de Huerta(2001) y Guerrero(1998), utilizando como período dominante del terreno 2 segundos y como aceleraciones máximas  $1.68 \text{ m/s}^2$  en la componente EW y  $0.98 \text{ m/s}^2$  en la componente NS. Además se presentan los acelerogramas sintéticos y reales del sismo del 19 de septiembre de 1985 de magnitud  $M_S = 8.1$ .

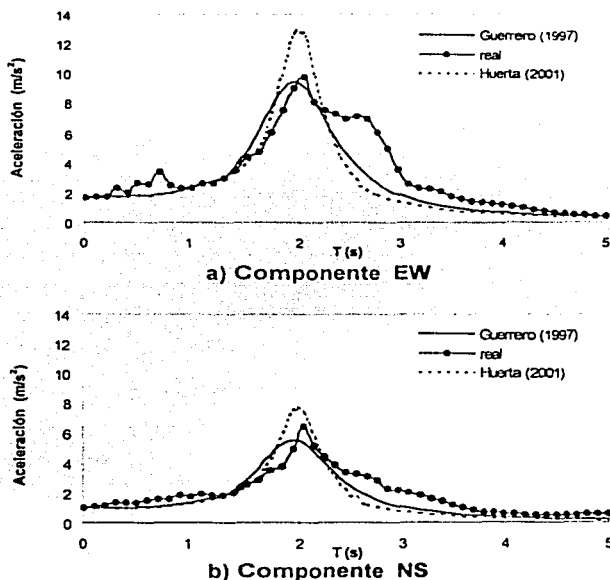


Figura 3.6 Espectros de aceleraciones sintéticos para el sismo de Michoacán del 19 de septiembre de 1985 - estación SCT; a) Componente EW y b) Componente NS.

Podemos decir que el modelo de acelerogramas sintéticos de Guerrero (1997) subestima el espectro de respuesta para el sismo del 19 de septiembre de 1985, mientras que el espectro de aceleración obtenido para la expresión de Huerta(2001) parece ser más conservador presentando valores por encima del espectro real, en el período dominante del suelo ( $T = 2$  segundos). Para períodos por debajo de los 2 segundos, los dos modelos subestiman las demandas de aceleración y no pueden reproducir el pico más pequeño del espectro real, correspondiente al segundo modo. Para períodos por encima del fundamental sucede el caso contrario, las expresiones empíricas subestiman las demandas de aceleración.

En la Figura 3.7 podemos ver los acelerogramas simulados obtenidos con las expresiones empíricas 2.31 y 2.32 conociendo la duración del movimiento, fase intensa, la aceleración máxima y el período dominante del suelo según el caso. Para evaluar la expresión empírica de Guerrero(1997) se tomó una duración del movimiento de 10 segundos correspondiente a 5 ciclos de 2 segundos, mientras que para la expresión de Huerta(2001) se empleó como duración de la fase intensa del movimiento  $T_d$  una fracción de su duración total. Se consideró la expresión para la duración total del movimiento  $D$  en el valle de México propuesta por Reinoso y Ordaz (2001) y se tomó  $T_d = 0.35 * D$  para el modelo, que se obtiene del valor medio de la relación de duraciones para las simulaciones obtenidas por Huerta (2001) en zona de lago y transición.

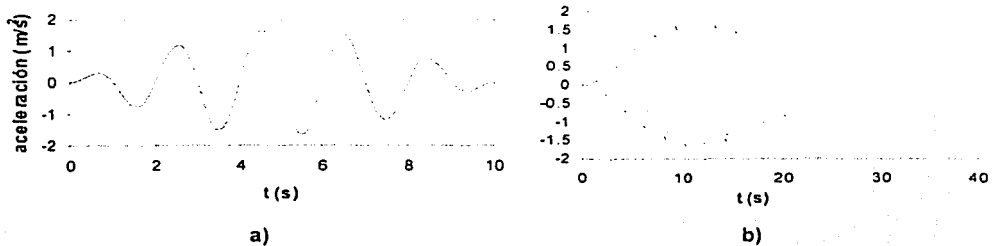


Figura 3.7 Acelerograma sintético obtenido para el sismo del 19 de septiembre de 1985 componente EW. a) expresión de Guerrero del Ángel; b) expresión de Huerta Gárnica.

En la Figura 3.8, se presentan los espectros sintéticos y reales de desplazamiento obtenidos para el sismo de Michoacán del 19 de septiembre de 1985 en el sitio SCT, tanto para la componente EW como para la NS a partir de los modelos empíricos de Guerrero(1988) y Huerta(2001), los cuales fueron obtenidos para la zona de lago del valle de México.

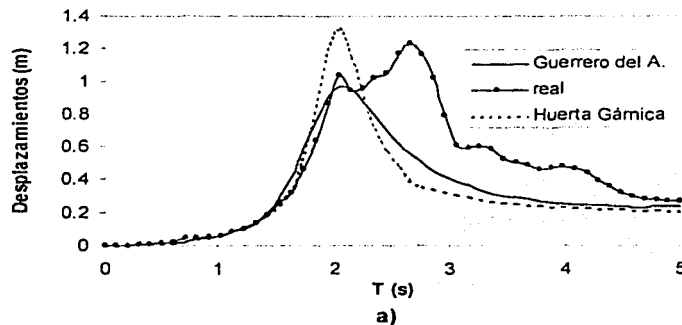
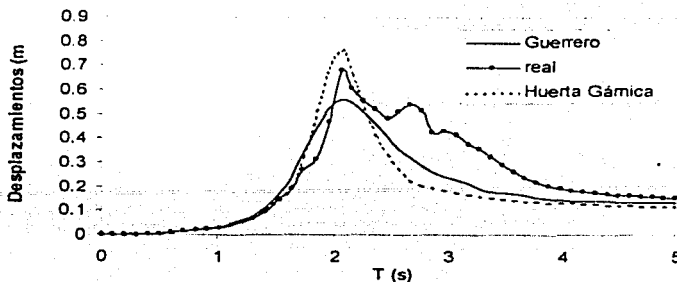


Figura 3.8 Espectros de desplazamientos sintéticos para el sismo de Michoacán del 19 de septiembre de 1985 - estación SCT; a) Componente EW, b) Componente NS.



b)

Figura 3.8 Continuación.

De los espectros de desplazamientos que obtuvimos podemos decir que dan muy buena aproximación para periodos menores que el periodo característico del sitio, en este caso terreno blando. El modelo de Guerrero del Angel subestima las demandas de desplazamientos para el periodo del suelo  $T_S$  mientras que el de Huerta Gárnica los sobrestima; podemos además notar que para periodos mayores  $T > 3$  segundos, la estimación de las demandas de desplazamiento no es tan buena pues ambos modelos presentan una forma muy definida y muy simétrica respecto al periodo dominante del sitio. Sin embargo para la componente EW para periodos muy grandes los espectros sintéticos dan una buena aproximación del desplazamiento máximo del suelo  $D_{MAX}$  ( $T > 5$  segundos).

### 3.2.2 Espectros de respuesta obtenidos a partir del modelo de funciones empíricas de Green (Ordaz y otros – 1995).

A continuación se presentan algunos ejemplos de cómo el modelo de funciones empíricas de Green permite obtener eventos de magnitud mayor que ocurren o provienen del mismo origen que nuestro sismo pequeño, ya sea subducción en el pacífico Mexicano o falla normal hacia en interior del país. Se presentan los espectros de respuesta en diferentes sitios y valores de la caída de esfuerzos según el caso.

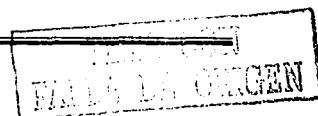
#### Caso I

Como aplicación del método de funciones empíricas de Green utilizaremos los registros obtenidos para el sismo del 25 de Abril de 1989 ( $M_S = 6.9$ ) ocurrido en San Marcos, Guerrero, como nuestro sismo postulado y el registro del sismo del 2 de Mayo de 1989 ( $M_S = 5.2$ ) como la función de Green para aproximar el primero. Para obtener los acelerogramas simulados utilizamos los registros del 2 de Mayo de 1989 para las estaciones COPL, CPDR y SMR2. Los parámetros utilizados tanto para el sismo postulado como para la función Green se encuentran en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Parámetros utilizados en la evaluación de las funciones de Green.

Fecha	Lat (N)	Long (W)	$M_0$ (dyna-cm)	$M$	$\Delta\sigma$ (bar)
25/04/1989	16.58	99.48	$2.4 \times 10^{26}$	6.9	150
02/05/1989	16.65	99.48	$1.9 \times 10^{24}$	5.2	200

Para la generación de acelerogramas sintéticos y posterior obtención de los espectros de aceleración se emplean los programas SIMF3 y GENBET3 (Ordaz y Arboleda, 2000) y el programa DEGTRA2000 (Ordaz y otros, 1990-2001) respectivamente.





El primero permite efectuar la convolución entre una función de tasa de momento simulada para una falla puntual a partir de una acelerograma, que se supone constituye una función de Green empírica, y requiere como datos de entrada el intervalo de tiempo ( $\Delta t$ ) al que se quieren calcular los acelerogramas sintéticos, las caídas de esfuerzos ( $\Delta\sigma$ ) y momentos sísmicos ( $M_0$ ) tanto para la función de Green como para el sismo postulado. El segundo programa produce un archivo de extensión \*.tab que corresponde a una tabla que contiene números aleatorios, obtenidos con una función de distribución de probabilidad de los tiempos de ruptura (filtro OSA), y requiere definir como parámetros de entrada los momentos sísmicos ( $M_0$ ) y las caídas de esfuerzos ( $\Delta\sigma$ ) para el sismo postulado y para la función empírica de Green. Finalmente, el tercer programa produce espectros de desplazamiento, velocidad y aceleración elásticos e inelásticos a partir del acelerograma sintético obtenido con los programas anteriores, para un  $\Delta t$  específico.

En la figura 3.9 se presentan los espectros de aceleraciones sintéticos para el sismo del 25 de abril de 1989, considerando como función de Green los registros obtenidos a partir de las estaciones COPL, CPDR y SMR2 para el 2 de Mayo de 1989.

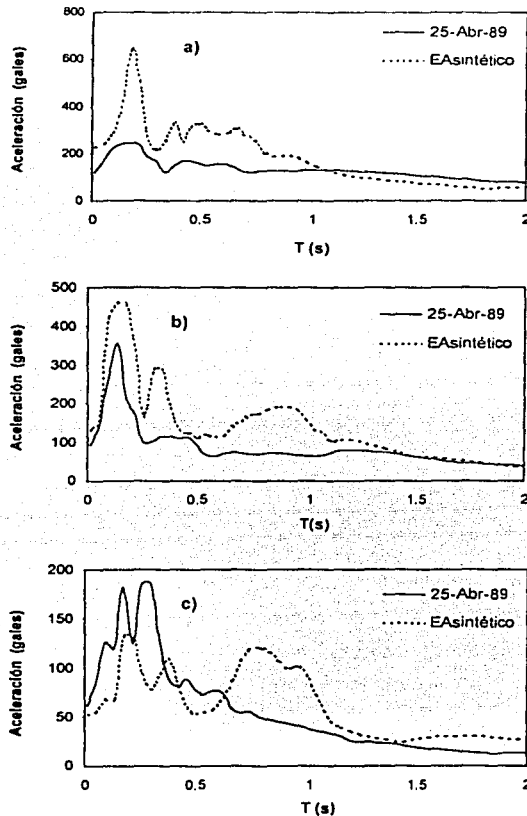


Figura 3.9 Espectros de aceleraciones sintéticos del sismo del 25 de abril de 1989 (componente EW); a) estación SMR2, b) estación CPDR y c) estación COPL usando el sismo del 2 de mayo de 1989 como función de Green.

En la figura 3.9, la diferencia entre el espectro observado del evento del 25 de abril de 1989 y el esperado obtenido empleando como función de Green el evento del 2 de mayo de 1989, para los sitios COPL, CPDR y SMR2S, es una consecuencia solo del modelo teórico de fuente supuesto. en este caso el  $\omega^2$  (Ordaz y otros, 1995).

### Caso II

Como una nueva aplicación del método de funciones de Green obtendremos para la zona del Valle de México los espectros de aceleraciones simulados (Componente NS) a partir de los registros del 25 de Abril de 1989 y del 2 de Mayo de 1989 de la estación CD, cuyos parámetros antes fueron especificados, para un sismo de magnitud  $M = 8.1$  con tres diferentes caídas de esfuerzos  $\Delta\sigma = 25$  bar,  $\Delta\sigma = 100$  bar y  $\Delta\sigma = 300$  bar, ver figura 3.11. En la figura 3.10 además se presenta el espectro de aceleraciones obtenido del registro de la estación CD (componente NS), para el evento del 19 de septiembre de 1985 de Michoacán de origen de subducción ( $M = 8.1$ ) cuyos parámetros de fuente son  $\Delta\sigma = 25$  bar y  $M_0 = 12 \times 10^{27}$  (Grupo de Sismología UNAM, junio de 1986).

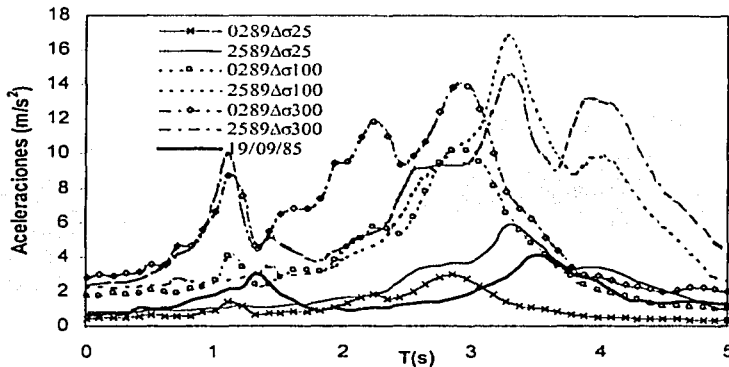


Figura 3.10 Espectros de aceleraciones (componente NS – estación CD) para un sismo futuro de magnitud  $M = 8.1$  usando como función de Green el sismo del 2 de mayo de 1989 y el registro del 25 de abril de 1989, para diferentes valores de caída de esfuerzos  $\Delta\sigma$ .

Se puede observar que los espectros de aceleraciones que se obtienen para caídas de esfuerzos de 100 bares y 300 bares sobrestiman el espectro real obtenido para el registro del sismo del 19 de septiembre de 1985 para la estación CD. Para el caso del registro sintético obtenido mediante funciones de Green, cuyos parámetros del evento esperado son  $M_0 = 12 \times 10^{27}$  y  $\Delta\sigma = 25$  bar, el espectro de aceleraciones tiene una buena aproximación en sus ordenadas para valores del periodo cercanos al periodo dominante del terreno  $T_S = 3$  segundos; se observa que el espectro real se encuentra desfasado hacia un periodo cercano a  $T_S = 3.5$  segundos, esto puede ser debido al comportamiento inelástico del suelo en este sitio. Las simulaciones correspondientes a una caída de esfuerzos de 25 bar, empleando tanto el evento del 2 de mayo de 1989 como el del 25 de abril de 1989, son las que reproducen de mejor forma la intensidad asociada a la aceleración del suelo en un periodo de  $T = 0$  segundos cuyo valor es de aproximadamente  $1 \text{ m/s}^2$ . Incluso empleando el evento del 2 de mayo como función de Green se alcanza a reproducir, en forma mas no en intensidad, el primer pico del espectro del 19 de septiembre de 1985 en el sitio CD cercano a un periodo de 1.5 segundos.

### Caso III

Podemos ilustrar las características del espectro de aceleración obtenido para el registro de la estación SCT del sismo de Michoacán de 1985 ( $M = 8.1$ ) utilizando funciones de Green. Para esto

consideramos como función de Green el registro de aceleraciones de la estación SCT del sismo del 25 de Abril de 1989 ( $M = 6.9$ ) cuya caída de esfuerzos vale  $\Delta\sigma = 150$  bar y con un momento sísmico de magnitud  $M_0 = 2.4 \times 10^{26}$  dynas - cm (Ordaz, Arboleda y Singh 1995). La simulación se hace al igual que en el caso anterior para tres caídas de esfuerzos de 25, 100, 200 y 300 bares para el evento postulado; además se incluyen las curvas espectrales para los modelos sintéticos de Guerrero y Huerta como se muestra en la figura 3.12.

En la figura 3.11 se muestran las comparaciones de los espectros de aceleración obtenidos para los modelos sintéticos anteriormente citados empleando los registros de la estación SCT para el sismo de Michoacán y se ve que los modelos simplificados tienen mayor aproximación con el espectro real; en el caso del modelo propuesto por Guerrero esto es debido a que el espectro tiene una forma regular con un pico dominante y un pequeño pico que representa el segundo modo del sitio; el modelo de Huerta Gárnica sobrestima el pico del espectro, en periodos cercanos al dominante del terreno  $T = 2$  segundos. A diferencia de los demás espectros los de la estación SCT presentan un segundo gran pico en un periodo superior al dominante  $T = 2.6$  segundos, el cual no se puede reproducir porque no está asociado a los efectos de sitio, por lo que para los espectros simulados no se obtiene una buena estimación del espectro para periodos superiores al dominante.

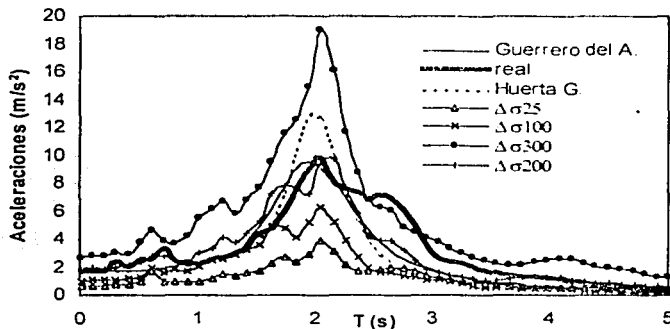


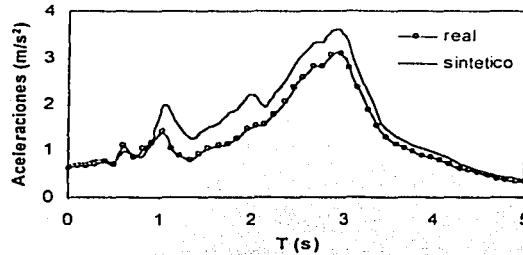
Figura 3.11 Espectros de aceleraciones sintéticos - estación SCT (componente EW) para el sismo de Michoacán del 19 de septiembre de 1985.

Entre las desventajas del método de funciones de Green están la necesidad de tener historias de aceleraciones sísmicas para poder obtener un registro simulado, además de que el número de superposiciones de la función de Green aumenta y el factor de escala disminuye a medida que el temblor objetivo crece con respecto a la función de Green, lo que implica un aumento en la varianza y por lo tanto, la verosimilitud del registro simulado decrece. Esta última puede ser la razón por la cual para la figura 3.12 las simulaciones obtenidas a partir del modelo de Green para el sismo del 19 de septiembre de 1985, considerando diferentes caídas de esfuerzos, no se aproximan al espectro real de aceleraciones. Se ve además que la caída de esfuerzos que mejor ajusta el espectro obtenido para la simulación es de 200 bares, pues hasta 2 segundos representa en buena forma el espectro real registrado en el sitio para este evento (19 de septiembre de 1985), partiendo de una aceleración de aproximadamente  $2 \text{ m/s}^2$  en  $T = 0$  segundos; después de 2 segundos aunque subestima las intensidades hasta 4 segundos reproduce la forma del espectro real.

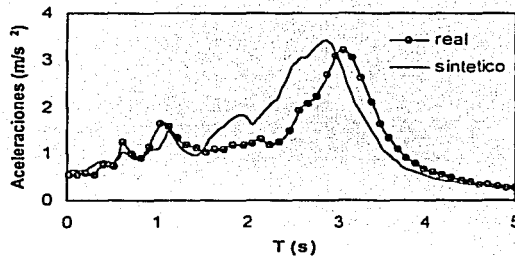
#### Caso IV

Como ejemplo práctico podemos simular el sismo del 25 de abril de 1989 de origen de subducción a partir del sismo del 2 de mayo de 1989 proveniente de la misma zona, que en este caso sería nuestra función de Green, utilizando los parámetros que se encuentran en la tabla 3.3.

Para esto utilizaremos los registros de la estación 49 del valle de México ubicada en terreno blando, tanto para la componente EW como para la componente NS; esto sería equivalente a llevar un sismo de magnitud  $M = 6.9$  (25 de abril de 1989) al valle de México, lo que produce espectros que hasta un  $T = 3$  segundos sobrestiman la respuesta del suelo como se ve en la figura 3.12 a) y b); para períodos muy bajos, es decir para la aceleración del suelo, tanto el espectro real (25 de abril de 1989) como el simulado presentan aceleraciones muy similares, aproximadamente  $0.6 \text{ m/s}^2$ .



a) Componente EW



b) Componente NS

**Figura 3.12** Espectros de aceleraciones del sismo del 25 de abril de 1989 y su simulación usando como función de Green el sismo del 2 de mayo de 1989; los registros pertenecen a la estación 54 del valle de México: a) Componente EW y b) Componente NS.

Ya vimos que es posible obtener simulaciones que den una buena idea del comportamiento del suelo en diferentes sitios del valle de México ante eventos que pueden ocurrir en la costa del Pacífico o hacia en interior del país, y que para ello es necesario conocer parámetros de la fuente como son la caída de esfuerzos y el momento sísmico; en los capítulos siguientes veremos cómo determinar acelerogramas asociados a una cierta intensidad que se puede presentar para un evento que tiene una frecuencia de ocurrencia de  $n$  años.

## CAPITULO IV

## OBTENCIÓN DE SIMULACIONES PARA UNA INTENSIDAD DADA EMPLEANDO FUNCIONES EMPÍRICAS DE GREEN

Algunas veces, no basta con definir los movimientos sísmicos por medio de un espectro de diseño, especialmente cuando se trata la evaluación de la respuesta en el rango inelástico. La mayoría de los códigos para el diseño sísmico consideran fuerzas relacionadas con parámetros de amplificación máxima tales como la aceleración espectral; estos parámetros no tienen una correlación directa con el daño, además no involucran el daño acumulado o la degradación debido a comportamiento histerético ante eventos sísmicos severos durante la vida útil de la estructura.

El daño estructural no sólo depende de la intensidad máxima del movimiento sino también de la historia completa que demanda antes y después de su máxima intensidad. Por esta razón actualmente se emplean acelerogramas sintéticos en la validación del diseño de estructuras importantes, especialmente si se desea estudiar su respuesta en el rango inelástico; sin embargo, en la actualidad su uso no es común para los ingenieros de la práctica porque existen muy pocos registros para estos fines, la identificación de parámetros es compleja, las técnicas para simular son numerosas y no hay claridad en las especificaciones de las normas técnicas al respecto.

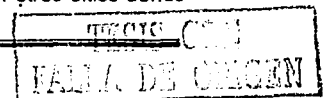
Cuando se emplean acelerogramas se desea que estos se aproximen lo más posible al movimiento que se espera en el lugar tomando en cuenta, para un  $T_R$  dado, la distancia epicentral, la magnitud, la profundidad, el mecanismo focal y el perfil del suelo. Muchas veces no es posible identificar adecuadamente todos estos parámetros para el sismo de diseño y, además, en aquellos casos en los cuales se conocen, no siempre es posible encontrar acelerogramas que cumplan todas las condiciones deseadas. Por esta razón hay necesidad de realizar simulaciones para estimar posibles movimientos y calibrar los espectros de diseño que se establecen en las normas de diseño actuales.

El uso de un solo acelerograma en el diseño podría no ser representativo de las características del movimiento sísmico en un sitio pues no consideraría todas las posibles fuentes que lo afectan. Por esta razón se habla de familias de acelerogramas, pues el diseño debe fundamentarse en un número tal que garantice la variación esperada del movimiento en el sitio de interés. La pregunta que surge es: ¿cuántos eventos provenientes de diferentes fuentes y con qué características se deberían considerar para el diseño de una estructura?. Según las Normas Técnicas Complementarias Sísmicas (NTCS-2002) se puede acudir para un análisis no lineal a acelerogramas de temblores reales o de movimientos simulados, o a combinaciones de éstos, siempre que se usen no menos de cuatro movimientos representativos, independientes entre sí, cuyas intensidades sean compatibles con los demás criterios que consignan el Reglamento y las normas, y que tengan en cuenta el comportamiento no lineal de la estructura y las incertidumbres que haya en cuanto a sus parámetros.

Para que el diseñador establezca un criterio adecuado para generar acelerogramas simulados, las investigaciones actuales deben encaminarse a: cuál sería el punto de comparación para decir que los acelerogramas que eligió o simuló el diseñador son representativos de los movimientos esperados del terreno y que cumplen con el mayor contenido de frecuencias y amplificaciones posibles, qué valor de las ordenadas espectrales de los movimientos esperados del terreno generados a través de simulaciones debe tener para cualquier periodo de vibración para ser asociado a un periodo de retorno y finalmente qué porcentaje de la envolvente del espectro de respuesta de los acelerogramas simulados empleados debe variar hacia arriba o hacia abajo con respecto a las ordenadas del espectro de diseño.

## 4.1 METODO

En este capítulo se presenta un procedimiento para obtener simulaciones asociadas a una intensidad del espectro de peligro uniforme (EPU) en un sitio en particular; este trabajo está enfocado al valle de México pero es posible implementar este método en otros sitios donde



se cuente con la información necesaria. El método empleado para obtener las diferentes simulaciones es el de funciones de Green empíricas (FGE) y considera que se conocen la caída de esfuerzos para el evento postulado mientras que para la FGE se conoce además de la caída de esfuerzos ( $\Delta\sigma_{03}$ ) el momento sísmico ( $M_{03}$ ). Sea una familia de acelerogramas asociados a un período de retorno  $T_R$  cualquiera, aquellos movimientos que provienen de una misma zona sísmogénica y cuya aceleración espectral corresponde a la ordenada del EPU para un período estructural  $T$  previamente seleccionado.

Cuando se requiere que el espectro de una simulación tenga un valor prefijado en una de sus ordenadas, se varía la aceleración máxima del terreno  $a_{T=0}$ , la del registro en la misma proporción en que se quiere variar la ordenada espectral, pues este es proporcional al valor de  $a_{T=0}$ . Este procedimiento conduce a una amplificación o reducción, de las ordenadas espectrales de aceleraciones en la misma proporción en que se modifique  $a_{T=0}$ .

#### 4.1.1 Acelerogramas

Para la obtención de simulaciones para una intensidad dada se consideran como datos el período estructural  $T$ , un período de retorno deseado  $T_R$ , el evento a emplear como la FGE para una zona sísmica, los cocientes espectrales de respuesta entre el sitio de interés y un sitio de referencia para el cual se conoce su curva de peligro sísmico, en nuestro caso se elige la estación CU en terreno firme. La metodología empleada para obtener diferentes acelerogramas asociados a una intensidad particular se describe a continuación:

1. Se elige un registro en el sitio donde se desea realizar la simulación. Este registro debe provenir de la zona sísmica de interés y se utilizará como FGE para la simulación. Cuando se refiere a un sitio en particular se puede contar o no con información registrada, si no se cuenta con ella se obtiene de estaciones cercanas o ubicadas en sitios cuyo período del suelo sea similar al lugar donde se desea realizar el estudio. En la figura 4.1 se observa la zona sísmológica idealizada en forma sombreada de donde proviene el evento utilizado como FGE registrado en algún sitio de la ciudad de México.

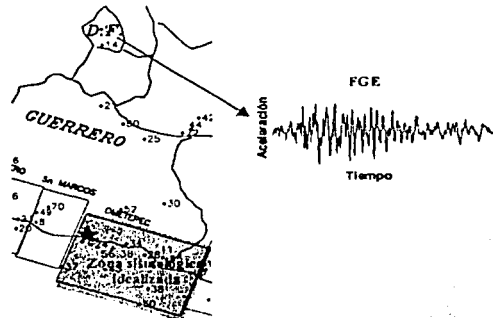


Figura 4.1. Zona sísmológica y evento utilizado como FGE en algún sitio de la Ciudad de México

2. Se elige el período de retorno del sismo ( $T_R$ ) para el cual se desea escalar el evento pequeño y se calcula la tasa de excedencia correspondiente como se muestra en la expresión (4.1).

$$\lambda = \frac{1}{T_R} \quad (4.1)$$

3. A partir de estudios sísmológicos se conoce la curva de peligro sísmico (CPS) del sitio de referencia (SR) para el período estructural requerido. Esta curva nos proporciona la

información de la aceleración máxima que se presenta en ese sitio asociada a un periodo de retorno debido a la fuente sísmica de interés.

4. Empleando la  $CPS$  existente en el sitio de referencia para una zona sismogénica y el cociente espectral de respuesta ( $CER$ ) entre el sitio de interés ( $SI$ ) y el de referencia ( $SR$ ), la curva de peligro sísmico en el sitio de interés ( $CPS_{SI}$ ) se puede representar por la expresión (4.2) y gráficamente se ve en la figura 4.2; cuando el sitio de interés se encuentre en terreno firme este paso del procedimiento se obvia y se emplea la curva de peligro sísmico del sitio de referencia para los pasos siguientes.

$$CPS(T)_{SI} = (CPS(T)_{SR})(CER(T)_{SI-SR}) \quad (4.2)$$

donde:

- $CPS(T)_{SI}$  abscisa de la curva de peligro sísmico ( $S_a$ ) en el sitio de interés para un  $T_R$ .  
 $CPS(T)_{SR}$  abscisa de la curva de peligro sísmico ( $S_a$ ) en un sitio de referencia para un  $T_R$ .  
 $CER(T)_{SI-SR}$  es la ordenada del cociente espectral, en el periodo estructural  $T$ , entre el sitio de interés y el sitio de referencia.

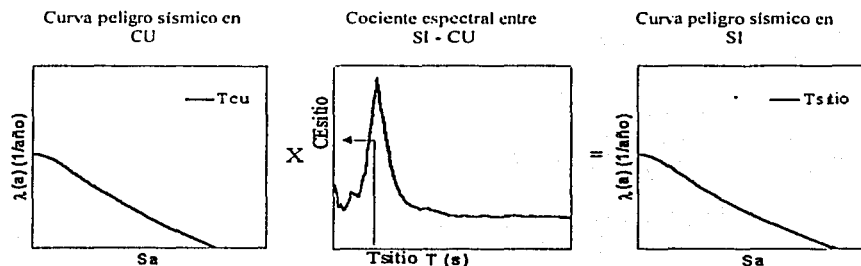


Figura 4.2 Obtención de la  $CPS_{SI}$  en un sitio de interés a partir de la  $CPS_{SR}$  conocida en un sitio de referencia, en este caso CU, y el cociente espectral entre ambos sitios

5. El procedimiento general es para  $\mu = 1$  y si es el caso este paso se obvia. Para obtener la  $CPS$  para un nivel de ductilidad ( $\mu = 2, 3$  ó  $4$ ) asociado a un periodo de retorno y un amortiguamiento  $\xi = 5\%$  se pueden utilizar las expresiones de Ordaz (1998) y la de Miranda (1994) y compararlas con los obtenidos empíricamente, como los cocientes entre el espectro elástico y los espectros para diferentes ductilidades. Se recomienda utilizar la expresión de Miranda por ser más simple, además de que es una envolvente de los espectros obtenidos empíricamente para diferentes sitios. Las expresiones de Miranda, en terreno firme y suelo blando, están dadas por:

$$R_{\mu}(T) = 1 + \frac{(\mu-1)}{\Phi(T)}; \text{ donde:}$$

$$\Phi(T) = 1 + \frac{1}{12T - \mu T} - \frac{2}{5T} \exp(-2(\ln T - 0.2)^2); \text{ suelo firme} \quad (4.3)$$

$$\Phi(T) = 1 + \frac{1}{1.8(T/T_s)} - 3.48 \exp\left(-2.17\left(\frac{T}{T_s} - 0.95\right) - \exp\left(-2.17\left(\frac{T}{T_s} - 0.95\right)\right)\right); \text{ suelo blando}$$

Y considerando las  $CPS_{SI}$  en el sitio de interés se puede obtener la  $CPS_{SI R_{\mu}}$  para una ductilidad a partir de la expresión (4.4), como sigue:

$$CPS_{SI R_{\mu}} = CPS_{SI} / R_{\mu} \quad (4.4)$$

- Con la curva de peligro sísmico  $CPS_{Si}$ , para la zona sismogénica de interés, se encuentra la intensidad correspondiente al período estructural ( $T$ ) de interés, para el período de retorno ( $T_R$ ) elegido y un nivel de ductilidad deseado ( $\mu$ ). Esto se ejemplifica en la figura 4.3.

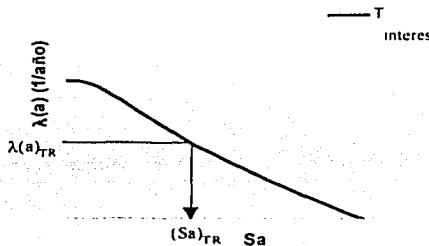


Figura 4.3 Aceleración espectral ( $S_a$ ) obtenida de una curva de peligro sísmico  $CPS_{Si}$  asociada a un período de retorno y un período estructural seleccionados

- Se obtiene a partir de las  $CPS_{Si}$  para diferentes  $T$  el EPU para el período de retorno elegido en el numeral (2) de la zona sismológica de interés; cada ordenada del EPU proviene de la  $CPS_{Si}$  correspondiente a un período estructural  $T$ . En la figura 4.4 se observa este EPU el cual considera que cada una de las intensidades espectrales que se presentan para los diferentes períodos estructurales  $T$  tienen la misma probabilidad de excederse en un tiempo determinado. Se obtiene todo el EPU y no solo la ordenada espectral asociada al período  $T$  de interés porque mas adelante se comparará con las simulaciones obtenidas para la fuente sísmica asociada.

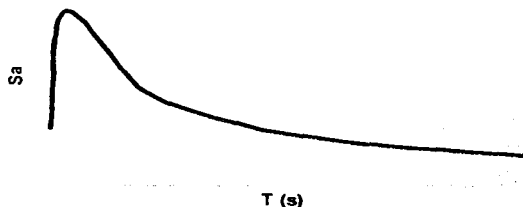


Figura 4.4 Espectro de peligro uniforme de la zona sismológica de interés

- Se obtiene un acelerograma cuya aceleración espectral corresponda a aquella encontrada de la curva de peligro sísmico del sitio de interés  $CPS_{Si}$  (paso 4) o del EPU (paso 7) asociado para el  $T$  elegido; esto se logra aplicando el modelo de FGE y variando el momento sísmico del evento postulado  $M_{ce}$  para caídas de esfuerzos ( $\Delta\sigma_{oe}$  y  $\Delta\sigma_{os}$ ) conocidas. En la figura 4.5 se observa de manera gráfica la obtención del acelerograma simulado para el  $T$  de interés asociado a un período de retorno.
- Con los numerales anteriores se obtiene una simulación cuya intensidad está asociada a un período de retorno  $T_R$ , a un período estructural  $T$ , a un evento considerado como FGE y a una zona sísmica en particular elegidos previamente. Si se desea obtener simulaciones para otros valores de estos parámetros se procede de manera semejante a partir del numeral (1); cuando se analiza el comportamiento de una estructura es importante tener en



cuenta simulaciones cuyas intensidades estén asociadas a eventos provenientes de las diferentes zonas sísmicas que pueden afectarla.

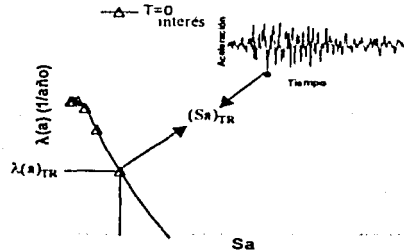


Figura 4.5 Aceleración espectral ( $S_a$ ) obtenida de una curva de peligro sísmico asociada a un periodo de retorno  $T_R$ , en este caso, al periodo estructural de  $T=0$  s

#### 4.1.2 Espectros de respuesta de las simulaciones realizadas para una intensidad dada

Luego de obtener las simulaciones asociadas a una intensidad del EPU en un sitio (Jaimes, 2003) considerando: un periodo de retorno  $T_R$ , diferentes periodos estructurales  $T$  y una FGE proveniente de una zona sísmica se obtienen sus espectros de respuesta, en este caso de pseudo-aceleraciones. Del EPU para el sitio de interés y cada espectro de respuesta medio resultante de las diferentes simulaciones para un  $T$ , se puede determinar el periodo estructural para el cual resulta una menor dispersión en el sitio respecto a los demás periodos considerados, es decir: qué periodo estructural, en el sitio, está asociado a aquellas simulaciones que mejor representan en todas sus ordenadas el espectro de peligro uniforme.

1. Se procede a calcular los espectros obtenidos a partir de cada simulación, relacionados a la intensidad de la  $CP_{S_i}$ , para un periodo estructural  $T$  elegido, así como para la zona sísmológica de donde proviene el evento considerado como la FGE. En la figura 4.6 se observan estos espectros de respuesta asociados a un periodo estructural  $T$  (p.e el periodo estructural de una estructura a analizar) y un periodo de retorno  $T_R$  cualquiera para las diferentes simulaciones obtenidas en un sitio de interés empleando el procedimiento del numeral 4.1.1.

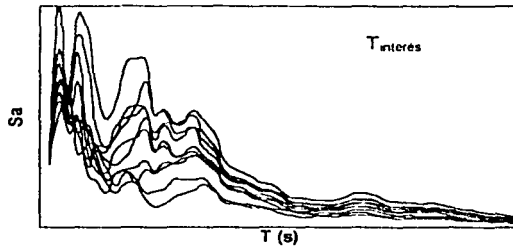


Figura 4.6 Espectros de respuesta de los acelerogramas simulados asociados a un periodo estructural ( $T$ ) y un periodo de retorno ( $T_R$ ) cualquiera.

2. Se obtiene el espectro de respuesta medio, que corresponde al espectro promedio de aquellos obtenidos a partir de una familia de acelerogramas provenientes de una zona sísmológica específica (ver figura 4.7) y cuya ordenada espectral está asociada a una intensidad del EPU.

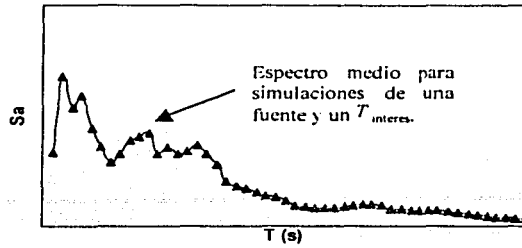


Figura 4.7 Espectro promedio de los espectros de respuesta de los acelerogramas simulados

- Los espectros medios obtenidos en el numeral 2, cada uno asociado a un período estructural, se comparan con el espectro de peligro uniforme EPU del sitio de interés (ver numeral 7, inciso 4.1.1) de acuerdo a la zona sísmológica correspondiente (ver figura 4.8). Se observa cual de ellos reproduce mejor en todas sus ordenadas el EPU y se considera que las simulaciones obtenidas para la ordenada del EPU en el período estructural  $T$  correspondiente, estarán asociadas a un nivel de intensidad requerido para el  $T_R$  seleccionado.

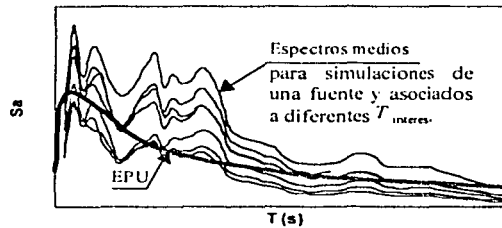


Figura 4.8 Comparación de espectros de respuesta promedios y el espectro de peligro uniforme de la zona sísmica de interés

- Se obtiene un espectro de respuesta global a partir de los espectros medios para cada período estructural considerado, presentados en el numeral (3); éste se compara con el espectro de peligro uniforme asociado al sitio para un evento ocurrido en una zona sísmológica específica (ver figura 4.9). Esto se hace simplemente para promediar las intensidades de los diferentes espectros medios relacionados a un  $T$  y comparar con las correspondientes período a período en el EPU para la fuente sísmica de interés.

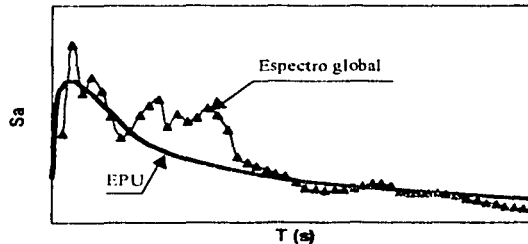


Figura 4.9 Comparación de espectro de respuesta medio global y el espectro de peligro uniforme

5. De los numerales (3) y (4) se puede seleccionar aquellas simulaciones cuyo espectro de respuesta presenta menor dispersión respecto al EPU del sitio de interés y esta asociado para los diferentes periodos estructurales  $T$  a las intensidades que se presentan para un  $T_R$  requerido. Esto con el fin de no subestimar o sobrestimar las ordenadas espectrales para los diferentes  $T$  del sitio.

#### 4.2 APLICACIÓN PARA ALGUNOS SITIOS DE LA CIUDAD DE MÉXICO

En los numerales 4.2.1 y 4.2.2 se ejemplifica paso a paso el procedimiento antes descrito, tanto para encontrar los acelerogramas asociados a una intensidad en un sitio del valle de México como sus espectros de respuesta que al final se compararán con el espectro de peligro uniforme para cada período de retorno considerado.

##### 4.2.1 Obtención de simulaciones para una intensidad dada

**Paso 1 y 2:** Se estiman movimientos del terreno en el valle de México para las estaciones CU, SCT, CD, 54 y 49 que resultarían de la ocurrencia de eventos futuros en diferentes fuentes sísmológicas, cuyas aceleraciones espectrales máximas con un amortiguamiento del 5% estén asociadas a períodos de retorno de 50, 125, 200, 250 y 475 años.

El método de simulación que se emplea es el propuesto por Ordaz y otros (1995). Se utilizan como FGE los registros en los sitios CU, SCT, CD, 54 y 49 correspondientes a los sismos de la tabla 4.1 en donde se mencionan algunos datos para la predicción de movimientos futuros considerando parámetros físicos de la fuente sísmica. Estos eventos se eligieron de tal forma que estuvieran bien registrados por la red acelerométrica del valle de México, esto proviene del capítulo I (numeral 1.4) de la clasificación previa efectuada para la información existente y consignada en el anexo A (tabla A.3 y figura A.1). Se seleccionó un evento de subducción y tres sismos de origen de falla normal provenientes de las zonas de Ometepepec (Z9), profundidad intermedia centro (Z5) y oeste (Z3) de acuerdo a la figura A.1 del anexo A. En la figura 4.10 se muestran los epicentros de los eventos tanto de falla normal como de subducción considerados. Los períodos del suelo en los cinco sitios varían entre 0.5 y 3.2 segundos de acuerdo al lugar donde está ubicada la estación; esto permite considerar cómo la intensidad y las características del movimiento sísmico pueden variar significativamente entre sitios cercanos debido a condiciones del suelo y efectos locales.

A continuación en la figura 4.11 se presentan los registros (componente EW) utilizados como FGE para las cinco estaciones, estos se dibujan a igual escala vertical en cada sitio para observar cómo allí las intensidades varían dependiendo de la zona sísmica de donde provenga el evento; la nomenclatura en la parte izquierda de las gráficas indica la estación donde se registró el evento. Estos acelerogramas se procesaron para poder ser utilizados en la simulación, esto consistió en corrección por línea base y filtrado mediante "pasa banda". El intervalo de frecuencias filtradas abarca de 0.15 Hz a 0.25 Hz en el límite inferior y de 47 Hz a 50 Hz en el límite superior.

Tabla 4.1 Datos de los sismos empleados como funciones de Green empíricas

Evento	Fuente	Sismo	$M_s$	$M_w$ *	Epicentro		Prof. km	Tipo	Momento sísmico $M_{os}$ (dina-cm)	Cajda de esfuerzo $\Delta\sigma_{os}$ (bar)
					Lat	Long				
					(°N)	(°W)				
1	Ometepepec	25/04/89	6.9	8.2	16.58	99.48	17	Sub	$2.4 \times 10^{26}$	150
2	Prof. Inter. Oeste	23/05/94	5.6	7.9	18.03	100.57	50	FN	$2.8 \times 10^{25}$	160
3	Prof. Inter. Centro	15/06/99	6.5	7.88	18.18	97.51	60-80	FN	$2.8 \times 10^{25}$	15
4		21/07/00	5.9		18.09	98.97	16	FN	$6.0 \times 10^{24}$	360

\* Rosenblueth y Ordaz, 1987

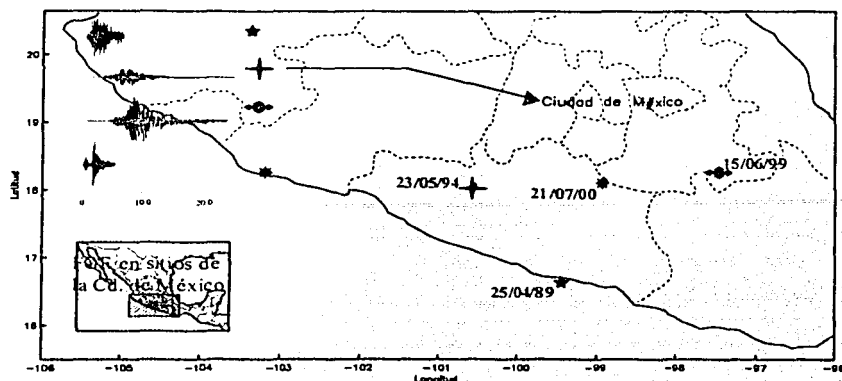


Figura 4.10 Ubicación de los epicentros de los cuatro eventos empleados como FGE registrados en CU.

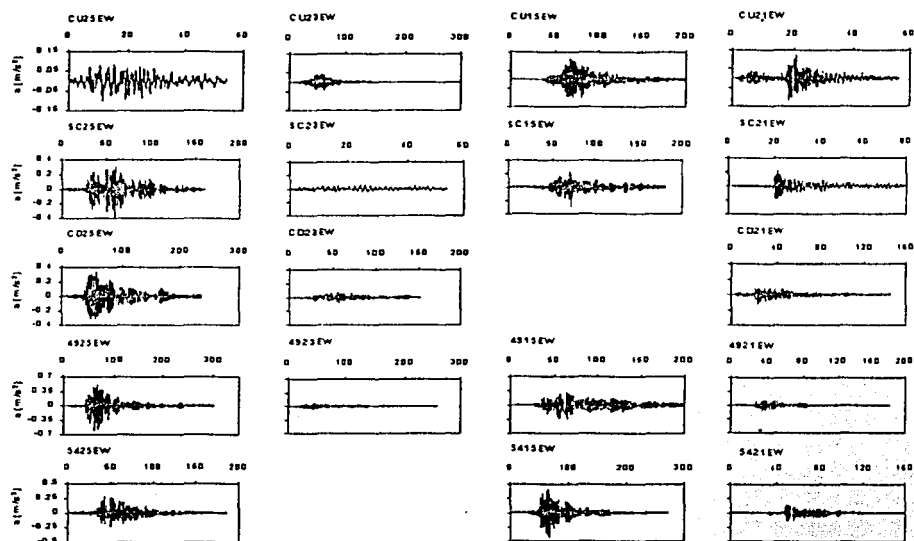
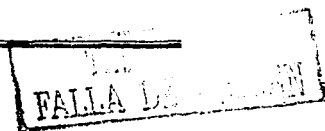


Figura 4.11 Registros empleados como FGE para diferentes sitios del valle de México

Paso 3: Para determinar los valores de aceleración máxima de algunos de los eventos hipotéticos, que razonablemente podrían ocurrir y que afectarán al valle de México, se utilizó la información sísmica de las fuentes localizadas en la costa del Pacífico, así como la del interior del país obtenida por diferentes investigadores (Rosenbluth y Ordaz, 1987; Reyes, 1999; Ordaz y otros 1999), en la que proporcionan información acerca de la contribución de cada fuente a la  $CPS_{SP}$  en un sitio,  $\lambda(a)$ , en este caso la estación CU.



En la figura 4.12 se muestran las curvas de peligro sísmico  $CPS_{SP}$  para el sitio CU generados para las tres fuentes sísmicas elegidas, para tres períodos estructurales obtenidas a través del programa CRISIS 2000 (Ordaz y otros, 2000). El programa permite calcular las curvas de tasa de excedencia de las ordenadas espectrales de interés en el sitio CU empleando las leyes de atenuación para sismos de subducción y de falla normal. Se eligen dos tipos de regresión no lineales para las funciones de peligro uniforme dependiendo de la zona sísmica de tal forma que se ajuste bien a los datos, ver expresiones (4.12). En la expresión empleada para las zonas de *Profundidad Intermmedia Oeste y Centro*, el parámetro  $y_M$  representa la máxima intensidad que puede tomar la función de peligro sísmico ( $FPS$ ) conocida.

$$v_y(y) = k \cdot (y)^{-r} \left( 1 - \left( \frac{y}{y_{MAX}} \right)^\beta \right) \quad \text{Profundidad Intermmedia Oeste y Centro} \quad (4.12)$$

$$v_y(y) = A \cdot e^{By} \quad \text{Subducción Ometepec}$$

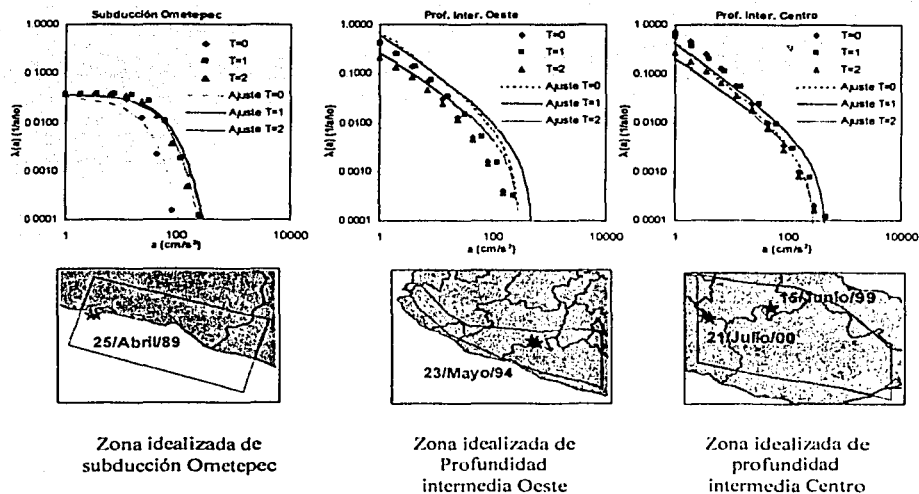
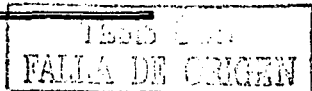


Figura 4.12 Ubicación de las FGE y curvas de peligro sísmico de diferentes fuentes sísmicas que afectan a la Ciudad de México en la estación CU

En la tabla 4.2 se muestran los coeficientes que definen las  $FPS$  de tres de las diversas fuentes que afectan a la ciudad de México para el sitio CU. Se observa una buena correlación de las  $FPS$ , dadas por los coeficientes  $k$ ,  $r$  y  $\beta$ , y los puntos obtenidos del programa Crisis 2000 para este sitio. Se trabaja con estas fuentes sísmicas debido a que de estas zonas provienen los registros usados para similar eventos futuros (ver tabla 4.1) y representan las fuentes de mayor actividad para el valle de México.

**Paso 4 y 5:** Se determinan el cociente espectral de respuesta  $CER_{SI} \cdot SP$  entre el sitio de interés  $SI$  y el sitio particular  $SP$  para el cual se conoce la curva de peligro sísmico, en este caso es la estación CU en terreno firme. El  $CER_{SI} \cdot SP$  representa solamente una relación que existe entre dos sitios para cada período estructural pero realmente no tiene una representación física.

En la tabla 4.3 se presentan los valores de amplificación y en la figura 4.13 se presentan los  $CER_{SI} \cdot SP$  promedio para los sitios 54, 49, CD y SCT y períodos estructurales de  $T = 0, 1$  y 2 segundos. Posteriormente empleando la expresión (4.2) y los valores de la  $CPS_{SP}$  dada por el Crisis 2000 para CU se obtienen las curvas de peligro sísmico de los diferentes sitios de interés



$CPS_{SI}$  y de igual forma que se procedió en la estación CU se realiza un ajuste de los coeficientes que definen las curvas de peligro sísmico  $CPS_{SI}$ , en el sitio de interés; todo lo anterior para una ductilidad  $\mu = 1$ , estos valores se presentan en la tabla 4.4.

Tabla 4.2 Coeficientes para el ajuste de las funciones de peligro sísmico en CU

Evento	Coef.	T=0	T=1	T=2
1	A	0.0426	0.0471	0.0410
	B	-0.0431	-0.0172	-0.02138
	k	0.8016	0.8535	0.7079
2	r	0.7950	0.6778	0.5977
	$\beta$	0.1434	0.1083	0.0616
	$y_{MAX}$	300	500	300
3 y 4	k	1.1118	0.8497	0.7313
	r	0.7392	0.6830	0.5735
	$\beta$	0.1865	0.1925	0.0805
	$y_{MAX}$	300	500	300

Tabla 4.3 Valores de amplificación para diferentes periodos estructurales en los sitios de interés

Estación	T = 0				T = 1				T = 2			
	SCT	CD	49	54	SCT	CD	49	54	SCT	CD	49	54
$CER_{SI-SP}$	3.218	2.968	4.274	3.462	2.197	3.778	5.664	7.374	7.611	3.618	6.507	2.334

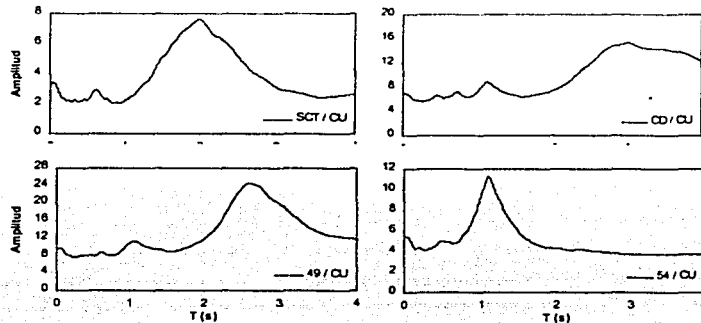


Figura 4.13 Cocientes espectrales de respuesta promedio  $CER_{SI-SP}$  de diferentes sitios respecto a CU

Paso 6 y 7: De estas  $CPS_{SI}$ , de sus FPS correspondientes, se pueden obtener las tasas de aceleración para diferentes periodos estructurales y de ahí que se puedan encontrar los espectros de peligro uniforme (EPU) para un sitio en particular asociados a un periodo de retorno determinado (Jaimes, 2003). En la figura 4.14 a 4.18 se aprecian los EPU obtenidos para los sitios y periodos considerados en este trabajo.

En general, se observa que para estructuras con periodo menor de 0.8 segundos los acelerogramas escalados asociados a periodos de retorno de  $T_R = 50, 125, 200, 250$  y 475 años deberían ser tomados de zonas de profundidad intermedia como son la centro y oeste que es donde se presentan las mayores intensidades; para estructuras con periodo estructural de  $0.8 < T < 4.0$  segundos los acelerogramas escalados asociados a los diferentes  $T_R$  deberían ser tomados de las zonas de subducción, y para estructuras con periodos estructurales mayores de  $T > 4.0$  segundos la zona sísmológica que se toma es indistinta.

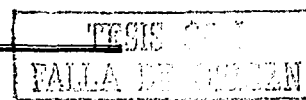


Tabla 4.4 Coeficientes para el ajuste de las funciones de peligro sísmico en otros sitios

Estación	Evento	Coef.	T = 0	T = 1	T = 2	
SCT	1	A	0.0427	0.0409	0.0410	
		B	-0.0134	-0.0078	-0.0028	
	2	k	2.6563	1.3637	1.2673	
		r	0.7381	0.6928	0.6420	
		$\beta$	0.1839	0.2230	0.2668	
		Y <sub>MAX</sub>	1098.7	1098.7	2283.3	
		k	1.4062	0.8413	0.9813	
	3 y 4	r	0.8609	0.7584	0.7168	
		$\beta$	0.3538	0.3762	0.4347	
		Y <sub>MAX</sub>	1098.7	1098.7	2283.3	
	CD	1	A	0.0427	0.04090	0.0410
			B	-0.0145	-0.0045	-0.0059
2		k	2.5124	1.9813	0.7034	
		r	0.7377	0.6916	0.7493	
		$\beta$	0.1824	0.2249	0.6634	
		Y <sub>MAX</sub>	890.3	1800	1085.4	
		k	1.3128	1.2711418	0.57677	
3 y 4		r	0.8606	0.75693	0.7184	
		$\beta$	0.3528	0.373954	0.4369	
		Y <sub>MAX</sub>	890.30	1800	1085.4	
49		1	A	0.0427	0.0409	0.0410
			B	-0.1010	-0.0030	-0.0033
	2	k	3.2789	2.6312	1.0827	
		r	0.7350	0.6922	0.6624	
		$\beta$	0.1842	0.2224	0.3381	
		Y <sub>MAX</sub>	1200	2800	1952	
		k	1.9476	1.7306	0.8827	
	3 y 4	r	0.8321	0.7587	0.7222	
		$\beta$	0.2610	0.3738	0.4455	
		Y <sub>MAX</sub>	1200	2800	1952	
	54	1	A	0.04267	0.0409	0.0410
			B	-0.0124	-0.0023	-0.0092
2		k	2.805726	2.8118	0.5293	
		r	0.737747	0.7258	0.6799	
		$\beta$	0.183722	0.3359	0.4145	
		Y <sub>MAX</sub>	1030	3683	700	
		k	1.4989	2.2822	0.4198	
3 y 4		r	0.8604	0.7252	0.7177	
		$\beta$	0.3529	0.2440	0.4401	
		Y <sub>MAX</sub>	1030	3683	700	

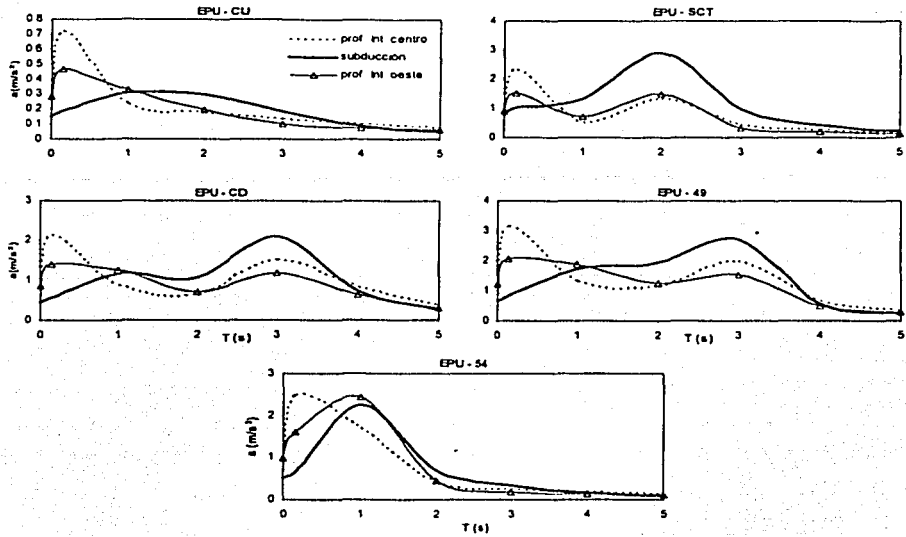


Figura 4.14 Espectros de peligro uniforme en diferentes sitios del valle de México ( $T_R = 50$ ).

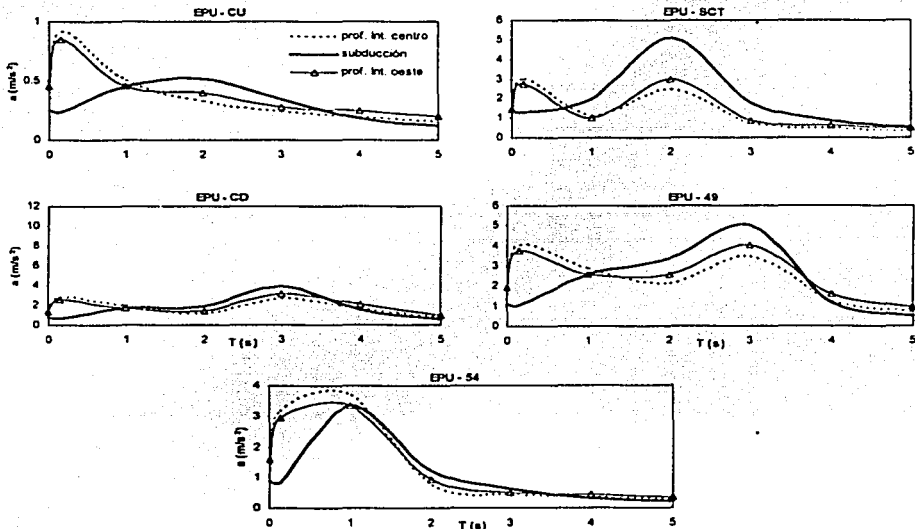


Figura 4.15 Espectros de peligro uniforme en diferentes sitios del valle de México ( $T_R = 125$ ).



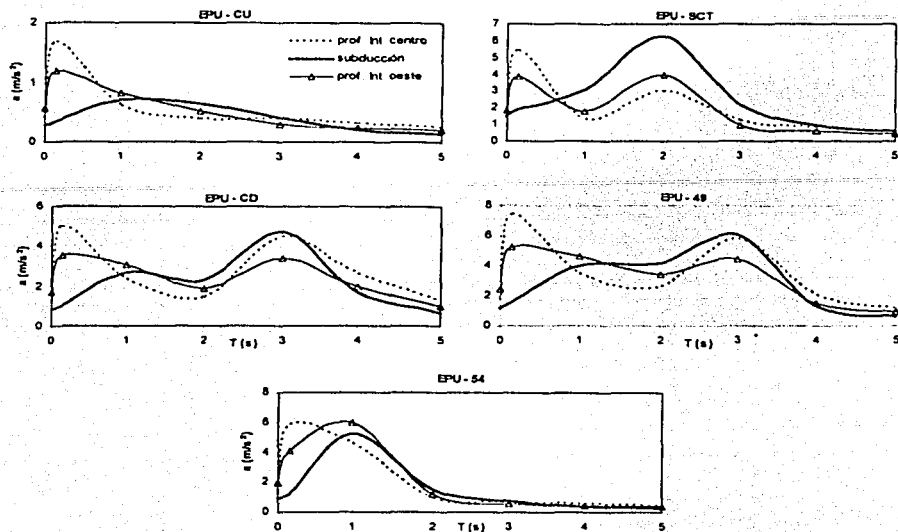


Figura 4.16 Espectros de peligro uniforme en diferentes sitios del valle de México ( $T_R = 200$ ).

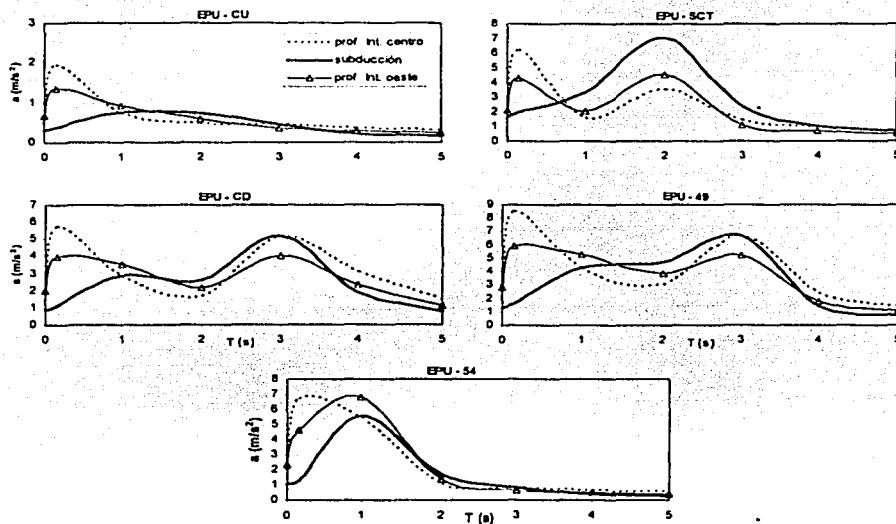
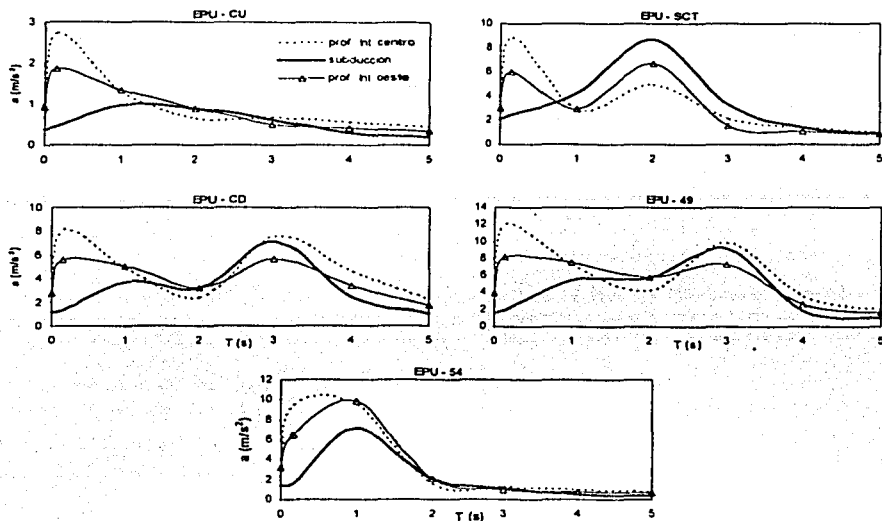


Figura 4.17 Espectros de peligro uniforme en diferentes sitios del valle de México ( $T_R = 250$ ).

TRABAJO CON  
FALLA DE CORTEN


 Figura 4.18 Espectros de peligro uniforme en diferentes sitios del valle de México ( $T_R = 475$ ).

En el sitio 54, para los  $T_R = 50, 125, 200, 250$  y  $475$  años, después de un segundo de período estructural, es indistinto de que zona se puedan tomar los acelerogramas debido a que para las diferentes zonas sísmicas se obtienen intensidades muy similares. Para los sitios asociados a las estaciones 49 y CD se puede observar que después de un período estructural de tres segundos, para períodos de retorno mayores o iguales a 200 años, es prácticamente indiferente elegir entre la zona de profundidad intermedia centro o la zona de subducción, incluso para períodos de retorno de 475 años y estructurales por encima de 3 segundos respectivamente, ya predominan los acelerogramas escalados provenientes de la zona de profundidad intermedia centro.

Las aceleraciones máximas buscadas correspondientes a los cinco períodos de retorno antes mencionados en los diferentes sitios, se muestran en las tablas 4.5 a 4.9. En ellas se muestran en las primeras tres columnas las zonas sísmológicas y eventos empleados como FGE, en la cuarta columna los diferentes períodos estructurales para los cuales se obtuvieron simulaciones y de la quinta a novena columna las intensidades asociadas a cada sitio, provenientes del EPU del mismo.

 Tabla 4.5 Aceleraciones espectrales asociadas en diferentes sitios a un  $T_R = 50$  años.

Evento	Sismo	Fuente	T	CU	SCT	CD	54	49
				$a_{se}$ cm/s <sup>2</sup>	$a_{se}$ cm/s <sup>2</sup>	$a_{se}$ cm/s <sup>2</sup>	$a_{se}$ cm/s <sup>2</sup>	$a_{se}$ cm/s <sup>2</sup>
1	25/04/89	Subducción Ometepec	0	15.1	81.1	44.8	52.3	64.5
			1	30.5	133.1	115.5	225.6	173.3
			2	29.6	289.4	107.2	69.2	192.8
2	23/05/94	Prof. Inter. Oeste	0	28.3	91.2	84.1	-	121.2
			1	32.9	72.5	124.6	-	186.9
			2	19.2	146.8	69.7	-	125.5
3 y 4	15/06/99 y 21/07/00	Prof. Inter. Centro	0	16.1	52.1	8.0	56.0	69.2
			1	23.1	50.9	87.5	170.8	131.2
			2	17.5	133.5	63.5	40.9	114.2

\*Para la estación CD del evento 15/06/99 no existe registro

Tabla 4.6 Aceleraciones espectrales asociadas en diferentes sitios a un  $T_R = 125$  años.

Evento	Sismo	Fuente	T	CU	SCT	CD	54	49
				$a_{se}$ cm/s <sup>2</sup>	$a_{se}$ cm/s <sup>2</sup>	$a_{se}$ cm/s <sup>2</sup>	$a_{se}$ cm/s <sup>2</sup>	$a_{se}$ cm/s <sup>2</sup>
1	25/04/89	Subducción Ometepec	0	25.00	134	74	87	107
			0.15	23.90	129	71	83	105
			1	45.40	198	172	335	257
			2	51.92	507	188	121	338
			3	34.02	179	390	62	503
			4	17.93	85	151	32	116
2	23/05/94	Prof. Inter. Oeste	5	11.51	52	57	21	53
			0	45.49	146	134	-	194
			0.15	84.10	275	253	-	375
			1	45.12	100	171	-	257
			2	35.13	299	142	-	256
			3	26.20	85	314	-	405
3 y 4	15/06/99 y 21/07/00	Prof. Inter. Centro	4	24.34	63	205	-	158
			5	19.92	47	99	-	92
			0	30.20	97	90*	105	129
			0.15	91.60	295	272*	317	403
			1	50.15	110	190*	370	284
	15/06/99 y 21/07/00	Prof. Inter. Centro	2	32.45	247	117*	76	211
			3	23.45	73	268*	43	347
			4	19.11	50	161*	34	124
			5	15.22	36	76*	27	70

\*Para la estación CD del evento 15/06/99 no existe registro

Tabla 4.7 Aceleraciones espectrales asociadas en diferentes sitios a un  $T_R = 200$  años.

Evento	Sismo	Fuente	T	CU	SCT	CD	54	49
				$a_{se}$ cm/s <sup>2</sup>	$a_{se}$ cm/s <sup>2</sup>	$a_{se}$ cm/s <sup>2</sup>	$a_{se}$ cm/s <sup>2</sup>	$a_{se}$ cm/s <sup>2</sup>
1	25/04/89	Subducción Ometepec	0	28.1	150.7	83.3	97.1	119.9
			1	71.0	309.1	268.4	523.8	402.3
			2	64.1	625.8	231.9	149.5	417.0
2	23/05/94	Prof. Inter. Oeste	0	57.8	186.0	171.5	-	247.0
			1	81.1	178.2	306.5	-	459.4
			2	52.6	400.2	190.2	-	342.1
3 y 4	15/06/99 y 21/07/00	Prof. Inter. Centro	0	41.6	133.8	123.4	143.9	177.6
			1	62.2	136.6	234.9	458.4	352.1
			2	39.9	303.7	144.4	93.1	259.6

\*Para la estación CD del evento 15/06/99 no existe registro

Tabla 4.8 Aceleraciones espectrales asociadas en diferentes sitios a un  $T_R = 250$  años.

Evento	Sismo	Fuente	T	CU	SCT	CD	54	49
				$a_{se}$ cm/s <sup>2</sup>	$a_{se}$ cm/s <sup>2</sup>	$a_{se}$ cm/s <sup>2</sup>	$a_{se}$ cm/s <sup>2</sup>	$a_{se}$ cm/s <sup>2</sup>
1	25/04/89	Subducción Ometepec	0	30.1	161.7	89.3	104.2	128.6
			1	75.7	329.7	286.2	558.7	429.1
			2	72.2	705.0	261.2	168.4	469.8
2	23/05/94	Prof. Inter. Oeste	0	66.1	212.7	196.2	-	282.6
			1	92.7	203.7	350.3	-	525.2
			2	59.9	455.9	216.7	-	389.8
3 y 4	15/06/99 y 21/07/00	Prof. Inter. Centro	0	47.1	151.8	139.9	163.2	201.6
			1	74.1	162.9	280.2	546.8	420.0
			2	46.1	351.5	167.1	107.7	300.5

\*Para la estación CD del evento 15/06/99 no existe registro

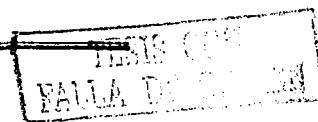


Tabla 4.9 Aceleraciones espectrales asociadas en diferentes sitios a un  $T_R = 475$  años.

Evento	Sismo	Fuente	T	CU	SCT	CD	54	49
				$a_{se}$ cm/s <sup>2</sup>	$a_{se}$ cm/s <sup>2</sup>	$a_{se}$ Cm/s <sup>2</sup>	$a_{se}$ cm/s <sup>2</sup>	$a_{se}$ cm/s <sup>2</sup>
1	25/04/89	Subducción Ometepec	0	39.3	211.1	116.6	136.0	168.0
			1	97.1	422.6	366.9	716.2	550.1
			2	89.2	871.8	323.0	208.3	580.9
2	23/05/94	Prof. Inter. Oeste	0	93.3	300.2	276.9	-	398.8
			1	133.6	293.8	505.1	-	757.2
			2	88.3	672.1	319.5	-	574.5
3 y 4	15/06/99 y 21/07/00	Prof. Inter. Centro	0	65.8	-	195.3	227.8	281.3
			1	128.1	281.6	484.2	945.0	725.9
			2	64.2	489.0	232.4	149.9	418.1

\*Para la estación CD del evento 15/06/99 no existe registro

Pasos 8, 9 y 10: Se obtienen inicialmente acelerogramas simulados cuya aceleración máxima del suelo  $a_{T=0}$  está asociada a un período de retorno ( $T_R$ ) para eventos provenientes de una determinada zona sísmica. Posteriormente se procede de igual forma a encontrar acelerogramas cuyos espectros de respuesta en una ordenada espectral en particular presenten valores asociados a un período de retorno ( $T_R$ ). En la figura 4.19 se presentan algunas de las simulaciones obtenidas para los diferentes períodos de retorno considerados.

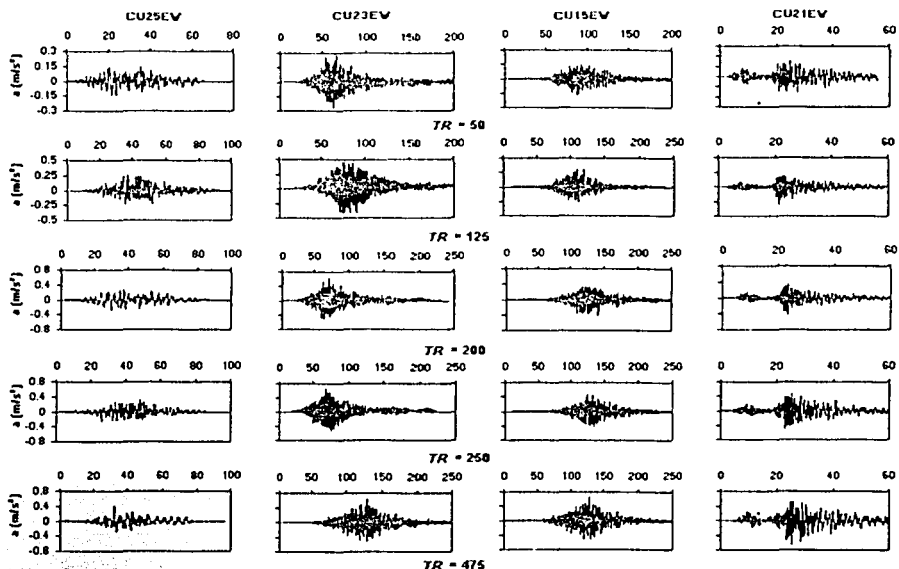
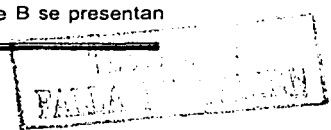


Figura 4.19 Acelerogramas simulados en CU para intensidades asociadas a la aceleración máxima del suelo ( $T = 0$ ) en diferentes períodos de retorno.

#### 4.2.2 Espectros de respuesta de las diferentes simulaciones

A continuación se hace una comparación entre los espectros de peligro uniforme obtenidos para los diferentes sitios asociados a las intensidades de eventos que ocurren con una frecuencia de  $n$  años y ocurren en diferentes zonas sísmicas. En el apéndice B se presentan



los espectros de aceleraciones obtenidos en cada caso y nos permitirán hacer una comparación entre los eventos provenientes de diferentes zonas sísmicas, en zonas de terreno firme y lago en ciudad de México y entre las intensidades obtenidas para los 5 periodos de retorno considerados en este trabajo.

**Paso 1:** Se obtienen los diferentes espectros de aceleraciones correspondientes a cada una de las simulaciones que conforman una familia de acelerogramas asociados a una intensidad particular y para ellas se encuentran los espectros medios referidos en el numeral 4.1.2 anteriormente.

**Pasos 2, 3 y 4:** Estos espectros del paso 1 se grafican con los EPU del sitio correspondientes (ver figuras 4.14 a 4.18) y se presentan en el anexo B. En este anexo se presentan dos grupos de gráficas: en primer lugar los resultados obtenidos del procedimiento propuesto para cada evento proveniente de una zona sísmológica en particular, para cada periodo estructural ( $T$ ) considerado periodos de retorno de  $T_R = 50, 125, 200, 250$  y  $475$  años; en segundo lugar y para facilitar su observación, los espectros medios obtenidos para cada periodo estructural provenientes de las diferentes simulaciones obtenidas para una zona sísmica. En el segundo grupo de gráficas también se presenta lo que en este trabajo llamamos los espectros medios globales, que no es más que el espectro medio de los espectros promedios para los diferentes  $T$ .

De las figuras B.1 a B.47 se puede observar cómo los espectros de cada simulación presentan la intensidad asociada a cierto periodo estructural para un evento que ocurrirá con una frecuencia de  $n$  años (ver tablas 4.5 a 4.9); por ejemplo para la estación CU, considerando la zona de Ometepec, un periodo estructural de 0 segundos y un periodo de retorno de 50 años se asocia una intensidad, de la tabla 4.5, de  $a_{g,e} = 15.107 \text{ cm/s}^2$  cuyo valor coincide en los espectros de las diferentes simulaciones correspondientes y en el EPU del sitio (ver figura B.1). todas las simulaciones obtenidas, independientemente de la zona sísmológica y el sitio deben coincidir con el espectro de peligro uniforme en la ordenada correspondiente al periodo estructural de interés.

Es importante resaltar que si se tiene una estructura cualquiera de periodo  $T$  es posible encontrar diferentes acelerogramas, pueden ser para diferentes momentos sísmicos y caídas de esfuerzos, los cuales presenten en su espectro de respuesta una intensidad similar a aquella que se espera genere un sismo que ocurrirá con cierto periodo de retorno. Es claro entonces que tenemos la posibilidad de obtener registros que permitan manejar mayores niveles de seguridad para el diseño de estructuras de mayor importancia considerando una zona sísmica. Como se dijo antes, la zona sísmica elegida depende de la forma que tengan para el sitio los espectros de peligro uniforme correspondientes, se elegirá aquella zona para la cual se esperan mayores intensidades y se tomará un evento originado allí del cual se conozcan los parámetros de fuente.

De las figuras B.1 a B.47 también se puede decir que para ciertos casos las simulaciones obtenidas no solo representan en buena forma la intensidad asociada a un periodo estructural determinado, sino que además cubren un amplio rango de periodos por lo cual se podría pensar que una(s) simulación(es) que cumpla con estas características puede representar una zona determinada, lo cual simplificaría el trabajo.

Por ejemplo, para la estación SCT, en el caso de  $T_R = 50$  años y la zona de Ometepec, las diferentes simulaciones que se obtuvieron para un periodo estructural de 2 segundos, sus espectros, en buena medida representan para periodos estructurales de 1 a 5 segundos las intensidades correspondientes al EPU (ver figura B.3). Otro caso como el anterior se presenta para la estación CD para un  $T = 0$  segundos y un  $T_R = 50$  años para la zona de Ometepec. Incluso se presentan casos como el del sitio CU para un  $T_R = 200$  años, para las zonas de Ometepec, profundidad intermedia centro y oeste, para los tres periodos estructurales estudiados ( $T = 0, 1$  y  $2$  segundos), en donde la mayoría de las simulaciones podría representar en buena forma el espectro de peligro uniforme correspondiente.

Estos casos antes mencionados son fortuitos y en caso de encontrarlos sería posible considerar esa simulación como aquella que representará la zona sísmica de interés, sin

embargo lo aplicable sería buscar simulaciones que estuvieran asociadas a la intensidad correspondiente del EPU para el período de la estructura que se piensa diseñar o revisar, según sea el objetivo de diseño. Es importante tener en cuenta que es difícil pretender representar con un solo evento proveniente de una zona sísmica el espectro de peligro uniforme asociado a las intensidades correspondientes a un evento que se presenta con cierta frecuencia pues solo se está tomando en cuenta un evento, que será nuestra FGE, generado en esta fuente y cómo afecta un sitio en particular y por lo tanto las posibles intensidades que generen para el mismo.

En los espectros de respuesta promedio presentados en el anexo B se muestran los espectros medios resultantes de las diferentes simulaciones para cada período estructural en los diferentes casos y de allí es posible mirar que período estructural está asociado de mejor forma a un sitio en particular y para cual zona sísmica. En la tabla 4.10 se muestran los períodos estructurales que mejor se asocian a la intensidad correspondiente a un evento que se espera se presente cada  $n$  años y proviene de una zona sísmológica específica.

Tabla 4.10 Período estructural asociado a la intensidad esperada para un evento con un período de retorno  $T_R$

$T_R$	Período estructural (T)														
	Ometepéc					Prof. Inter. Oeste					Prof. Inter. Centro				
	50	125	200	250	475	50	125	200	250	475	50	125	200	250	475
CU	1	1	2	0	2	1	1	2	2	2	1	1	2	0	0
SCT	2	1	2	0	2	2	1	2	2	2	1	1	2	2	1
CD	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	0	2	0	0	1
49	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
54	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	2	1	1	1	1

De la tabla 4.10 se podría decir por ejemplo, que para generar simulaciones en CU cuyas intensidades sean acordes a aquella esperada, asociada a un período de retorno, se debe tomar en cuenta la zona sísmológica de donde proviene dicho acelerograma. Es decir:

Para la zona sísmológica de *Ometepéc* se debe relacionar la intensidad asociada a períodos de retorno de 50 y 125 años a un período estructural alrededor de 1 s, así como también esta se correlaciona con la aceleración máxima del suelo. Mientras que para  $T_R$  de 200 y 475 años las aceleraciones esperadas estarán asociadas a 2 segundos. Finalmente para 250 años el período estructural que mejor representa las diferentes intensidades del EPU será el obtenido para 0 segundos.

Para la zona sísmológica de *profundidad intermedia oeste* la intensidad asociada a períodos de retorno de 50 y 125 años se correlacionan mejor a las simulaciones obtenidas para la intensidad relacionada a un período estructural alrededor de 1 segundo. Para las intensidades asociadas en este sitio (CU) para  $T_R$  de 200, 250 y 475 años, el período estructural que mejor representa el EPU es el de 2 segundos.

Y para la zona sísmológica denominada de *profundidad intermedia centro* la intensidad asociada a períodos de retorno de 50, 125 y 200 años sería para los dos primeros casos de  $T = 1$  segundo y para el tercero de  $T = 2$  segundos. Para eventos que se esperan ocurran en 250 y 275 años el período estructural asociado sería el correspondiente a la aceleración del suelo en el sitio, es decir  $T = 0$  segundos.

De la tabla 4.10 también se puede decir que para la zona de *Ometepéc* y para un  $T_R$  de 250 años en los cinco sitios considerados en el valle de México, las simulaciones cuyos espectros representan de mejor forma las intensidades del EPU de cada sitio son las correspondientes a un  $T = 0$  segundos. Esto mismo se ve para un período estructural de 2 segundos en la zona sísmológica de *profundidad intermedia oeste* para los sitios CU, SCT, CD y 49 para  $T_R$  de 200, 250 y 475 años.

Además para los cinco períodos de retorno en la zona de *Ometepéc* el período estructural que mejor se asocia en todas las intensidades del EPU en cada sitio, para CD, 49 y 54 es  $T = 0$

segundos. Esto mismo sucede para 2 segundos en la zona de *profundidad intermedia oeste* en las estaciones CD y 49; y en la zona de *profundidad intermedia centro* para la estación 49.

Podríamos decir además de las figuras del anexo B y de la tabla 4.10 que para eventos provenientes de la zona de *Ometepec* en terreno firme, en este caso CU, si necesitamos encontrar una simulación que este asociada a una intensidad del EPU del sitio para un periodo de retorno dado, solo basta con obtener aquella cuya intensidad sea la aceleración del suelo ( $T = 0$  segundos); en caso que de que el sitio de interés no este en terreno firme, el periodo estructural para el cual las simulaciones obtenidas presentarán mayor concordancia con las diferentes intensidades del EPU del sitio respecto a *Ometepec* será el periodo del suelo. Por ejemplo para la estación SCT se obtendrán simulaciones para un  $T = 2$  segundos independientemente del periodo de retorno.

En la tabla 4.11 se presentan las magnitudes asociadas a cada simulación realizada para el sitio CU para un periodo de retorno de 125 años y la caída de esfuerzos indicada, además se relacionan a cada periodo estructural. Como se dijo antes el proceso de encontrar las simulaciones que representen una intensidad particular del EPU de un sitio para un periodo estructural es iterativo hasta encontrar el momento sísmico  $M_{so}$  adecuado. Las magnitudes de la tabla 4.11 se obtienen de la expresión 1.2 dada por Hanks y Kanamori (1979) para el momento sísmico del evento relacionado a la intensidad buscada.

Tabla 4.11 Datos de sismos utilizados como FGE para la estación CU para un  $T_R = 125$  años

Evento	Simulación	MAGNITUDES						
		Periodo estructural						
		0	0.15	1	2	3	4	5
Evento 25/Abril/1989 $\Delta\sigma=100$	1	8.1	7.6	7.6	8.2	8.1	7.6	7.9
	2	7.8	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	8.2
	3	7.9	7.9	7.6	7.7	7.6	7.6	7.9
	4	7.9	7.6	7.7	7.8	7.6	7.6	7.6
	5	7.6	7.6	7.6	8.2	7.6	7.6	7.6
	6	7.8	7.7	7.6	7.6	7.6	7.6	8
	7	8	7.6	7.6	7.9	8.1	7.6	7.6
	8	7.6	7.6	7.6	8.1	7.6	7.6	7.6
	9	7.8	7.8	7.6	8	7.6	7.5	8.1
	10	8	7.5	7.6	7.6	7.7	7.6	8
Evento 23/Mayo/1994 $\Delta\sigma=160$	1	8.4	8	8.2	7.8	8	7.7	8
	2	8.2	8	8.2	7.7	8.2	7.7	8.3
	3	8.3	7.8	8.2	7.8	8.5	7.7	8.4
	4	8.2	8.1	8.3	7.8	8.1	7.7	8
	5	8.3	8	8.2	7.8	7.8	7.8	8.5
	6	8.2	7.9	8.2	7.9	8	8.2	8
	7	8.4	8	8.2	8.1	8.2	7.8	8.4
	8	8	8	8.2	8.2	8.3	7.8	8
	9	8.3	8	8.4	8.1	7.8	8.4	8.2
	10	8.3	8.1	8.2	8.3	7.8	8.3	8.5
Evento 15/Junio/1999 $\Delta\sigma=15$	1	7.9	8.4	7.8	7.7	7.7	7.7	7.7
	2	7.9	8.4	7.8	7.7	8	7.7	7.7
	3	7.9	8.2	7.9	7.6	7.7	7.9	7.7
	4	7.8	8.3	7.9	7.8	7.7	7.7	7.7
	5	7.7	8.4	7.9	8	7.7	7.7	7.7
	6	8	8.3	7.7	8	7.7	8.4	7.7
	7	8	8.2	8	7.7	7.7	7.9	7.9
	8	8	8.2	7.8	7.9	7.7	7.8	7.9
	9	7.8	8.2	7.7	7.7	7.7	8	7.7
	10	7.9	8.4	7.7	8	7.8	7.7	8
Evento 21/Julio/2000 $\Delta\sigma=300$	1	6.5	7.2	7	6.7	6.9	6.9	7.3
	2	6.8	7	6.5	7	7	6.9	7.2
	3	6.7	6.8	6.7	7	6.9	6.9	7.2
	4	6.7	7	6.8	7	6.9	6.9	7.1
	5	6.7	6.9	6.5	6.8	6.9	6.9	7.3
	6	6.8	7.1	6.5	6.8	7.2	7	7.2
	7	6.5	7	7	6.8	6.9	6.9	7.2
	8	6.5	7	6.5	6.8	6.9	6.9	7.2
	9	6.5	6.9	6.5	6.6	6.9	6.9	7.1
	10	6.6	6.9	6.6	7	6.9	7	7.2

En esta tabla se puede observar que para algunas simulaciones, el proceso iterativo alcanza valores del momento sísmico  $M_{oe}$  que está relacionada con la expresión de Kanamori con una magnitud de ondas superficiales mayor a las máximas esperadas en las zonas sismogénicas. esta magnitud máxima  $M_u$  para cada fuente se indica en la tabla 4.1. Este es el caso para el evento del 15 de Junio de 1999 que pertenece a la zona sismológica denominada profundidad intermedia centro, para la cual para un periodo de  $T=0.15$  segundos se alcanzan magnitudes superiores a  $M_u = 7.88$  para simulaciones cuyas aceleraciones espectrales corresponden a las obtenidas de las curvas de la tasa de excedencia para dicha zona. Se debe pensar entonces que estas simulaciones que corresponden a momentos sísmicos cuyas magnitudes superan las máximas esperadas en una zona contribuyen en forma importante a la dispersión de los resultados medios obtenidos.

Podemos relacionar la diferencia entre las medias de los espectros obtenidos y los espectros de peligro uniforme (EPU) además con la obtención de simulaciones correspondientes a sismos con magnitudes superiores a las esperadas en una zona sismogénica; se debe buscar entonces acelerogramas cuya magnitud se encuentre por debajo de la máxima esperada, de acuerdo a su origen, y con aceleraciones relacionadas a la ordenada espectral del espectro de peligro uniforme para un periodo  $T$  en el sitio. Así como la tabla 4.11 obtenida para CU, se pueden obtener tablas para los diferentes sitios y periodos de retorno indicando las magnitudes correspondientes a cada simulación, esto nos permitirá observar que aquellos eventos cuyo espectro supera en buena forma, para un periodo estructural, las ordenadas del EPU presentan magnitudes superiores a las máximas que se espera se presenten en una fuente.

Sin embargo, hay que considerar que solo se tomó un evento, a lo sumo 2, en cada zona sismológica y es necesario contar con la contribución de más eventos que provengan de la misma zona sismológica para llegar a conclusiones más concretas. También, es necesario realizar más simulaciones para otros niveles de intensidad y reafirmar o no las observaciones anteriormente expuestas.



## CAPÍTULO V

### NÚMERO DE ACCLEROGRAMAS Y CONFIABILIDAD DE UN EDIFICIO DE 12 NIVELES AFECTADO POR EVENTOS FUTUROS DE DIFERENTES FUENTES SISMOLÓGICAS

En este capítulo se estudia el comportamiento de un edificio de 12 niveles de marcos planos sometido a los eventos simulados en el capítulo IV, cuyas intensidades están asociadas a la ordenada del espectro de peligro uniforme en un sitio para un período de retorno dado; se evalúa el comportamiento de esta estructura en diferentes sitios del valle de México y se trata de encontrar un número de acelerogramas asociado a cada zona sísmológica, de falla normal o subducción, evaluando la confiabilidad estructural del sistema a través de planteamientos y expresiones empleadas en otros trabajos (Chan 2003; Shome, 1998 y 1999).

#### 5.1 PROCEDIMIENTO

##### 5.1.1 Número de acelerogramas para evaluar la respuesta de la estructura

Se procede a encontrar para una estructura determinada qué número de simulaciones  $N$  se requieren para evaluar su respuesta, bajo cierto nivel de confianza y un cierto margen de error, ante eventos sísmicos provenientes de una zona sísmica asociados a un  $T_R$  particular. Las simulaciones empleadas estarán relacionadas con las intensidades correspondientes a las curvas de peligro sísmico del sitio de interés ( $CPS_{SI}$ ) para el período de la estructura  $T$  o para cualquier período diferente que sea de interés; esto se presenta en el capítulo 4.

1. Se establece cual será la medida que representará el daño de la estructura: ductilidad de desplazamiento, energía histerética normalizada, índice de daño ó máxima distorsión de entrepiso, entre otras.
2. Se somete la estructura a las diferentes simulaciones para un período  $T$  de interés.
3. Se obtiene el valor de la medida que representará el daño (envolventes) y se determina cual nivel de la estructura es el más afectado para el sitio de interés.
4. Se obtiene el número de sismos necesarios para representar de forma adecuada la respuesta de una estructura ante un evento proveniente de una zona sísmica. Para el caso en el que la medida de daño está asociada a la distorsión máxima que se presenta en la estructura el número de simulaciones se determina con la expresión (5.1) dada por Shome y otros (1998 y 1999); en el Apéndice C se da una explicación sobre la misma.

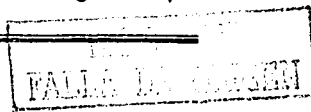
$$N = \frac{\sigma_{inD}^2}{e^2} \quad (5.1)$$

donde:  $N$  es el número de registros necesarios para tener una banda de confianza "una desviación estándar requerida",  $e$  es el error del estimador (10%) y  $\sigma_{inD}$  es la desviación estándar de las distorsiones en un nivel de la estructura para las diferentes simulaciones.

5. De igual forma se puede evaluar el comportamiento de una estructura en diversos sitios, para valores del período estructural  $T$  cualquiera y para eventos asociados a diferentes períodos de retorno  $T_R$ , provenientes de otras zonas sísmicas, efectuando los numerales anteriores.

##### 5.1.2 Determinación de la confiabilidad de un sistema estructural

Para evaluar la influencia que tiene el elegir un número  $N$  de simulaciones de una zona sísmica, para un período  $T$  y un período de retorno elegido  $T_R$ , es necesario realizar un estudio de confiabilidad estructural en el sitio de interés, considerando las posibles fuentes sísmogénicas que



lo afectan. Con ello se determinará un valor de probabilidad de excedencia de la medida de daño que depende del tipo, la importancia y la fuente sísmica que afecta la estructura por diseñar.

1. Se determina la confiabilidad sísmica estructural representada mediante las funciones de peligro sísmico de las demandas de construcciones. Tanto Esteva y Ruiz (1989) como Alamilla (2001) especifican que la curva de peligro de la demanda estructural que determina la confiabilidad del sistema se puede obtener a partir de la expresión (5.2).

$$v_D(d) = \int -\frac{\partial v_y(y)}{\partial y} \cdot P(D \geq d|y) \cdot dy \quad (5.2)$$

Donde  $v_y(y)$  es la tasa media anual de excedencia de la intensidad estudiada, es decir la CPSs;  $P(D \geq d|y)$  es la probabilidad condicional de que la distorsión  $D$  exceda un nivel de daño  $d$ , debido a la acción de un sismo de intensidad  $Y$ . En este caso la intensidad ( $Y$ ) equivale a la pseudoaceleración.

2. Chan (2003) a partir de la expresión (5.2) y considerando una función de densidad de probabilidad lognormal  $f_D(d)$  para las distorsiones como la dada en la expresión (5.3) y según la igualdad (5.4), representa la confiabilidad sísmica estructural según la expresión (5.5).

$$f_D(d) = \frac{1}{d \cdot \sqrt{2\pi} \sigma_{\ln D}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \left[\frac{1}{\sigma_{\ln D}} \cdot \ln\left(\frac{d}{D}\right)\right]^2\right] \quad (5.3)$$

$$F_D(d) = \int f_D(d) = P(D \leq d, y) = P(\ln D \leq \ln d, y) \quad (5.4)$$

$$v_D(d) = \int -\frac{\partial v_y(y)}{\partial y} \left[1 - \Phi\left(\frac{\ln(d/D)}{\sigma_{\ln D}}\right)\right] \cdot dy \quad (5.5)$$

Donde  $\Phi$  representa la función de distribución acumulada normal estándar.

3. La tasa media anual de excedencia de intensidades ( $S_a$ ) se ajusta con las expresiones (5.6); se considera para las curvas de excedencia de intensidades dos tipos de regresiones según la zona sísmica de interés.

$$v_y(y) = k \cdot (y)^{-r} \left(1 - \left(\frac{y}{y_{uvv}}\right)^\beta\right) \quad \text{Profundidad Intermedia Oeste y Centro} \quad (5.6)$$

$$v_y(y) = A \cdot e^{B \cdot y} \quad \text{Subducción Ometepec}$$

4. Se obtiene las derivadas de las tasas de excedencia de intensidades dadas por las expresiones (5.7) según la fuente sísmica:

$$\frac{\partial v_y(y)}{\partial y} = \frac{-ky^{-r}}{y} \left[ r - r \left(\frac{y}{y_{uvv}}\right)^\beta + \beta \left(\frac{y}{y_{uvv}}\right)^\beta \right] \quad \text{Profundidad Intermedia Oeste y Centro} \quad (5.7)$$

$$\frac{\partial v_y(y)}{\partial y} = AB \cdot e^{B \cdot y} \quad \text{Subducción Ometepec}$$

5. Las distorsiones de entrepiso ( $D$ ) se ajustan con la expresión (5.8) (Cornell, 1996; Shome, 1998 y 1999) para el sitio de interés. En la figura 5.1 se observa un ejemplo de este tipo de ajuste, en el cual se ve la tendencia de aumentar las distorsiones conforme a las intensidades.

$$D = a \cdot (y)^b \quad (5.8)$$

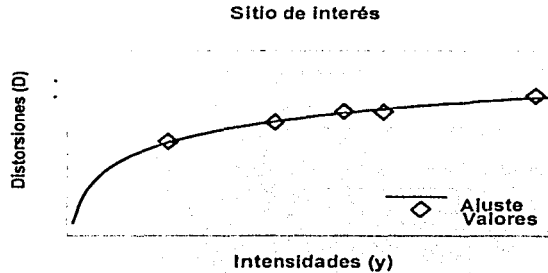


Figura 5.1 Distorsión de entrepiso vs. Intensidades

6. Las desviaciones estándar logarítmicas ( $\sigma_{\ln D}$ ) se ajustan con la expresión (5.9) para el sitio de interés; se emplea el mismo tipo de ajuste que en el numeral 5. En la figura 5.2 se observa un ejemplo del ajuste con esta expresión.

$$\sigma_{\ln D} = c \cdot (y)^d \quad (5.9)$$

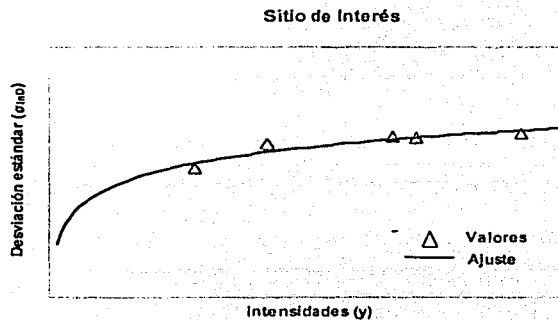


Figura 5.2 Desviación estándar vs. Intensidades

7. De la expresión (5.8) se despeja la intensidad ( $Y$ ) y se sustituye en la (5.9), para obtener una relación entre las distorsiones y la desviación estándar como se muestra en la siguiente expresión:

$$\sigma_{\ln D} = c \cdot \left[ \left( \frac{D}{a} \right)^{1/b} \right]^d \quad (5.10)$$

8. Se resuelve la expresión (5.5) sustituyendo la derivada de la tasa media anual de excedencia de intensidades dada por la expresión (5.7); la probabilidad condicional de que la distorsión  $D$  exceda un nivel de daño  $d$ , debido a la acción de un sismo de intensidad  $Y$ , se obtiene

sustituyendo las expresiones (5.8) y (5.10) para  $\Phi$ . Los límites de la integral estarán dados de  $y = 0$  hasta  $y = y_{MAX}$  que representan los límites inferior y superior de la CPSs. Las expresiones para las diferentes fuentes serán las que se muestran a continuación:

Para las zonas de *profundidad intermedia Oeste y Centro*:

$$v_D(d) = \int_0^{y_{MAX}} \frac{ky^{-r}}{y} \cdot \left[ r - r \left( \frac{y}{y_{MAX}} \right)^\beta + \beta \left( \frac{y}{y_{MAX}} \right)^\beta \right] \left[ 1 - \Phi \left( \frac{\ln(d/D)}{\sigma_{\ln D}} \right) \right] dy \quad (5.11)$$

Para la zona de *Ometepéc*:

$$v_D(d) = \int_0^{y_{MAX}} AB \cdot e^{By} \left[ 1 - \Phi \left( \frac{\ln(d/D)}{\sigma_{\ln D}} \right) \right] dy \quad (5.12)$$

En la figura 5.3 se observa un ejemplo de la tendencia de la curva de peligro de la demanda estructural de cómo la probabilidad de alcanzar un estado límite disminuye conforme el nivel de daño aumenta; sin embargo cabe notar que no tiene sentido considerar un daño tal en la estructura, asociado a un estado límite, que la probabilidad de alcanzarlo sea prácticamente cero.

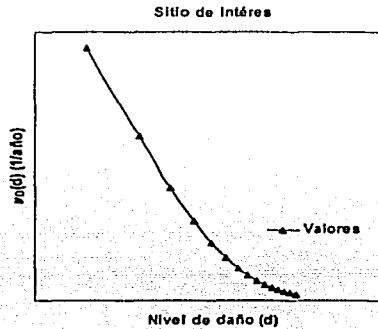


Figura 5.3 Tasa de demanda estructural vs. Nivel de daño

## 5.2 APLICACIÓN

A continuación se aplica el procedimiento para evaluar la respuesta de una estructura de 12 niveles, para determinar cómo se comporta al someterla a la acción de acelerogramas asociados al EPU para diferentes períodos de retorno, y encontrar un número de acelerogramas representativos de una zona bajo un nivel de confiabilidad en diferentes sitios de interés dentro del valle de México, para terreno firme y zona de lago. Con lo anterior se podrá determinar qué evento proveniente de alguna zona sísmica presenta mayor probabilidad que se sobrepase un estado límite.

### 5.2.1 Obtención del número de acelerogramas

**Paso 1:** Se establece como medida de daño la máxima distorsión de entrepiso ( $d_i$ ) dada por la expresión (5.13).

$$d = \frac{(\delta_{i+1} - \delta_i)_{max}}{h_i} \quad (5.13)$$

donde  $(\delta_{i+1} - \delta)_i$  es el máximo desplazamiento relativo entre dos niveles consecutivos  $i$  e  $i+1$  y  $h_i$  es la altura del entrepiso  $i$ .

Como medida del daño, al igual que Shome (1998 y 1999), Chopra (2001) y Chan (2003), se empleó el exponencial del promedio de los logaritmos naturales de los datos observados (expresión 5.14) y la desviación estándar del logaritmo natural de las distorsiones (expresión 5.15) ya que estos son estimadores lógicos de la mediana y la dispersión, especialmente si los datos presentan una distribución lognormal (Benjamin y Cornell, 1970). Se define  $n$  como el número de observaciones o eventos simulados.

$$D = \exp \left[ \frac{\sum_{j=1}^n \ln d_j}{n} \right] \quad (5.14)$$

$$\sigma_{\ln D} = \left[ \frac{\sum_{j=1}^n (\ln d_j - \ln D)^2}{n-1} \right]^{1/2} \quad (5.15)$$

En general, las distorsiones de entrepiso presentan asimetría en sus histogramas, con un máximo hacia la izquierda y se atenúan en la parte derecha del histograma. En ingeniería la función de densidad de probabilidad lognormal es la primera elección en este tipo de histogramas (Shome y otros, 1999 y Chan, 2003). Para la determinación empírica de un modelo de distribución que se ajuste a los datos se puede recurrir a graficarlos en una hoja de probabilidad la cual esta asociada a una función de distribución específica, en nuestro caso Lognormal (ver figura 5.4); si los datos graficados estan aproximadamente sobre una línea recta entonces el modelo de distribución es adecuado (Ang y Tang, 1976; Shome, 1999).

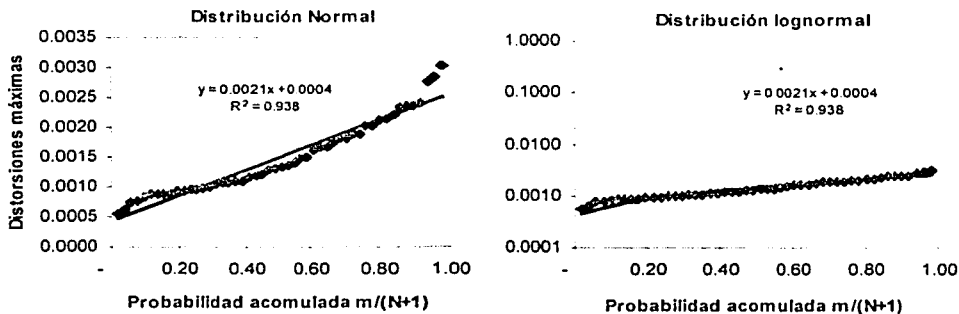


Figura 5.4 Distorsiones máximas de entrepiso de la estructura de 12 niveles en el sitio CU, para diferentes simulaciones, FGE el evento 25/04/89 y asociadas a  $T = 1$  segundos del EPU, graficadas en papel de probabilidad Normal y Lognormal.

**Paso 2:** Se realizó el análisis inelástico de una estructura simétrica de 12 niveles diseñada a base de marcos planos de concreto reforzado, un sótano, un cajón de cimentación y pilotes de fricción. Los marcos están compuestos por 3 crujías con claros libres de 6 m en ambas direcciones ortogonales entre sí, la altura de los entrepisos es constante e igual a 3 m (figura 5.5).

El sistema de piso está formado por una losa de concreto armado de 12 cm de espesor. Los elementos no estructurales, como son los muros divisorios, se proyectan en forma desligada de la estructura principal, aunque se tomaron como parte en la definición de las especificaciones de

carga con un valor estimado de  $100 \text{ kg/m}^2$ . La magnitud neta de las cargas muertas y vias de cada entrepiso fue de  $530$  y  $180 \text{ kg/m}^2$ , respectivamente, y para la azotea de  $450$  y  $70 \text{ kg/m}^2$ . Esta edificación fue cimentada sobre la zona del lago, y destinada a oficinas. De acuerdo con el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (RCDF, Arnal y otros, 1991) correspondería a una estructura tipo B construida sobre la zona III.

El edificio se analizó con el metodo estático propuesto en las Normas Técnicas Complementarias para Sismo (NTCS) del mencionado reglamento, con un coeficiente sísmico  $C_s=0.4$  y un factor de comportamiento sísmico  $Q = 4$ , el dimensionamiento de los elementos estructurales (ver figura 5.6) se llevo a cabo con ayuda de programas de cómputo de análisis elástico y el RCDF (Guerrero, 1997).

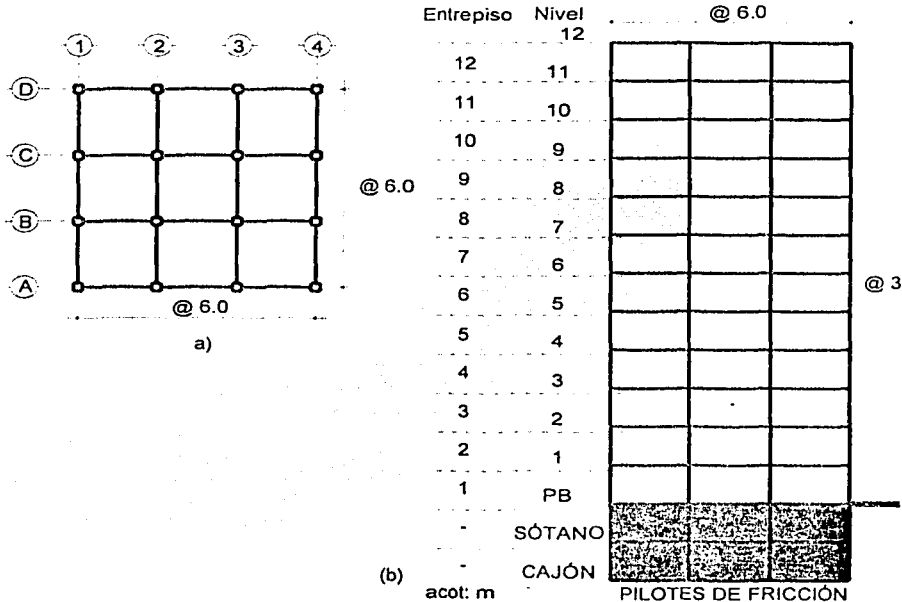
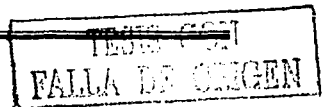


Figura 5.5 Geometría de la estructura de 12 niveles analizada: a) planta y b) elevación (marco A)

**Diseño de los elementos estructurales** (Guerrero, 1997): Los tamaños propuestos de columnas y traveses fueron los necesarios para que las deformaciones laterales de entrepiso debidas a la fuerza cortante resultaran no mayores de 0.012 veces la altura de entrepiso. La resistencia a compresión del concreto y nominal a la fluencia del acero empleadas fueron de  $250 \text{ kg/cm}^2$  y  $4200 \text{ kg/cm}^2$ , respectivamente. La figura 5.6 muestra las dimensiones y la distribución de los armados finales en los elementos estructurales y la tabla 5.1 proporciona algunas características de las secciones transversales de dichos elementos.

Entre las características dinámicas del edificio se tiene una estimación del período fundamental de vibración incluyendo interacción suelo estructura. Para considerar la interacción suelo estructura se propuso un suelo ficticio en la base del cajón de cimentación, con propiedades calculadas del apéndice 7 de las NTCS del RCDF considerando una profundidad del estrato arcilloso dentro del valle de México de 40 m y un período dominante del suelo igual a 2 segundos. El período calculado de la estructura fue de 1.48 s.



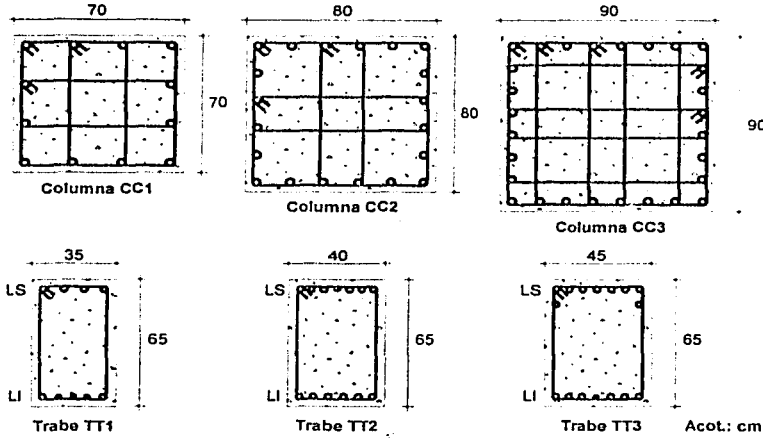


Figura 5.6 Dimensiones y distribución del armado en elementos estructurales

Tabla 5.1 Características generales de las secciones transversales de traves y columnas

ELEMENTO	SECCIÓN (cm)	ARMADO	ESTRIBOS (sep. en cm)	ENTREPISO	NIVEL
CC1	70 x 70	12 # 10	# 4 @ 10	9 - 12	-
CC2	80 x 80	20 # 10	# 4 @ 10	5 - 8	-
CC3	90 x 90	28 # 10	# 4 @ 10	1 - 4	-
TT1	35 x 65	(LS) 4 # 8 (LI) 2 # 8 y 3 # 6	# 3 @ 10	-	9 - 12
TT2	40 x 65	(LS) 6 # 8 y 1 # 6 (LI) 6 # 8	# 3 @ 7	-	5 - 8
TT3	45 x 65	(LS) 7 # 8 y 2 # 4 (LI) 6 # 8 y 1 # 6	# 3 @ 6	-	1 - 4

Se procede a modelar la estructura para un análisis inelástico considerando interacción suelo estructura. Para ello se utilizó el programa DRAIN 2D, la estructura fue sometida a los diferentes eventos simulados, aproximadamente 3000 simulaciones, considerando los sitios de interés (SCT, CU, 49, 54 y CD), cinco diferentes períodos de retorno, tres períodos estructurales y tres zonas sísmicas.

**Paso 3:** Se obtiene el valor de la medida que representará el daño (envolventes), en este caso las distorsiones, y se determina qué entrepiso de la estructura es el más afectado para los diferentes sitios de interés y períodos de retorno, como se puede ver en la figura 5.7. En las figuras 5.7a y 5.7b se muestra la distribución de distorsiones para el edificio de 12 niveles en el sitio SCT, afectado por simulaciones cuya fuente es la zona de *Ometepec* y de *profundidad intermedia centro* para diferentes períodos de retorno  $T_R$ , y en la figura 5.7c la distribución de las distorsiones en altura para el sitio SCT cuando la estructura es sometida a diferentes simulaciones, que provienen de las tres fuentes sísmicas estudiadas para eventos que se presentarían con una frecuencia de 475 años. En los tres casos las intensidades están relacionadas a la intensidad del EPU correspondiente a un período estructural de  $T = 2$  segundos, que corresponde al período del suelo.

En la figura 5.7a y 5.7b se muestran las distorsiones en un mismo sitio para eventos simulados para diferentes períodos de retorno provenientes de la zona de *Ometepec* y de *profundidad*

*Intermedia Centro* se observa cómo a medida que el período de retorno aumenta las demandas estructurales son mayores. Para la figura 5.7c se muestran las demandas en SCT cuando la estructura se ve afectada por eventos de diferentes fuentes sísmicas para eventos que se presentan con una frecuencia de 475 años, en este sitio se aprecia que la fuente que mayor demanda estructural exige es la de *Ometepec*. Allí, se puede observar cómo el valor de la distorsión máxima permisible o de diseño 0.012 se alcanza para sismos de subducción para periodos de retorno mayores de 125 años; para sismos de falla normal esto no sucede pues la estructura está ubicada en terreno blando y afectan principalmente eventos de contenido de frecuencias bajas provenientes de la costa.

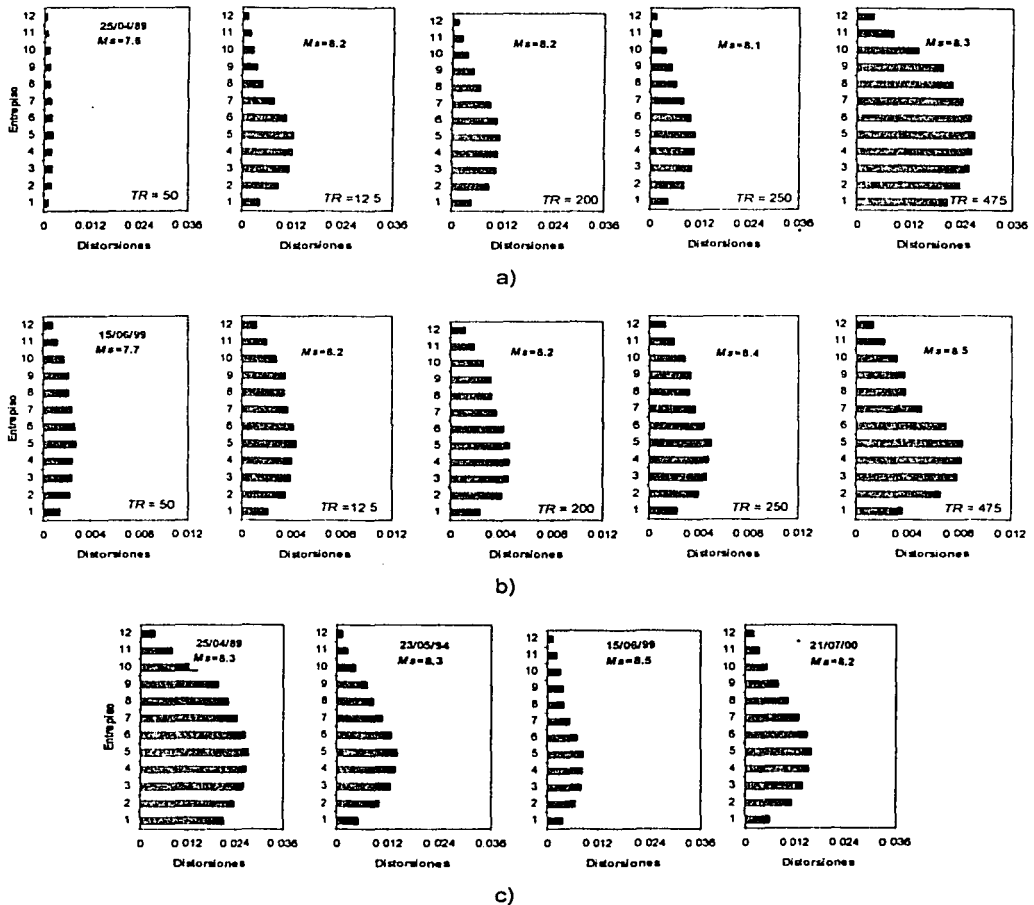
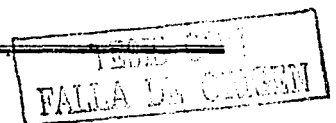


Figura 5.7 Distorsiones de entrepiso en un edificio de 12 niveles situado en SCT ante eventos provenientes de diferentes fuentes sísmicas, asociadas a la intensidad esperada para diferentes  $T_R$  y un  $T = 2$  segundos.





Se muestra cómo el quinto nivel es el más afectado ya sea considerando eventos que provienen de diferentes zonas y asociándolos a un período estructural cualquiera, o para eventos que provienen de una misma zona pero se presentan con una frecuencia diferente. Además para los diferentes sitios (CU, SCT, CD, 49 y 54), diferentes intensidades asociadas a los períodos estructurales ( $T = 0, 1$  y  $2$  segundos) del EPU en el sitio y para los períodos de retorno considerados, se observó que el nivel que mayores distorsiones presentó fue el quinto entrepiso, esto no se mostró pues es solo ilustrativo como se ve en la figura 5.7.

**Paso 4:** A continuación en las figuras 5.8 a 5.12 se hace una descripción de las distorsiones (D) y número de acelerogramas (N) en cada sitio, considerando simulaciones asociadas a períodos estructurales de  $0, 1$  y  $2$  segundos para los períodos de retorno antes considerados. Se empleó la expresión (5.1) para el número de acelerogramas y nos centramos en los resultados obtenidos para el entrepiso que mayores demandas presenta, que como vimos en el numeral anterior es el quinto.

#### *Distorsiones del edificio*

En la figura 5.8 se muestran, para un período de retorno de 50 años, las distorsiones medias obtenidas de someter la estructura a cada una de las simulaciones generadas para un sitio en el valle de México, asociadas a la intensidad del EPU correspondiente y para el período estructural elegido, en nuestro caso  $0, 1$  y  $2$  segundos. Las figuras presentan en el eje vertical las distorsiones promedio de todas las simulaciones obtenidas para el caso y en el eje horizontal la relación entre el período estructural ( $T_{esl}$ ) y el período del suelo ( $T_s$ ); se indica cada sitio del valle de México donde se analizó la estructura y el número de acelerogramas según la desviación estandar de los datos en el sitio (expresión 5.1).

Estas curvas representan cómo responde la estructura, qué distorsiones se presentan en el quinto entrepiso considerando que el edificio está ubicado en diferentes sitios de la ciudad de México, para eventos futuros que tienen una frecuencia de ocurrencia de  $n$  años y para la intensidad del EPU asociada a un período estructural  $T$ . Se puede observar en todos los casos (figuras 5.8 a 5.12) que para eventos con período de retorno menores de 125 años las distorsiones están por debajo de la distorsión de diseño, en este caso  $0.012$ , excepto para el caso de la estación 49 para eventos provenientes de las zonas de *Profundidad Intermedia Oeste* y *Ometepec*, para períodos estructurales de  $T = 0$  y  $2$  segundos respectivamente; para estos dos casos se obtienen respectivamente desplazamientos de  $0.025$  y  $0.015$  veces la altura de entrepiso.

Las curvas presentan una forma bien definida, en la mayoría de los casos, con el máximo cerca del punto donde el período estructural y del suelo coinciden, es por ello que para las estaciones 54 y SCT, con los períodos más cercanos al del suelo, en gran número de casos se evidencia que allí se dan las mayores amplificaciones en la respuesta estructural. Además a medida que la estructura se lleva a sitios con período del suelo muy diferente al estructural, en la mayoría de los casos, las distorsiones no son importantes; es importante aclarar que esta curva se trazó a lo sumo con cinco puntos, dependiendo si en la estación se tenía o no información sobre el evento en particular, se necesitarían más puntos para definirla bien y poder relacionar de forma más precisa las distorsiones en diferentes sitios del valle de México.

Como se esperaba en el caso del sitio CU (figuras 5.8 a 5.12), las distorsiones en ninguno de los casos (período de retorno, período estructural o evento proveniente de una zona sísmogénica) tiene valores relevantes, pues la estructura fue diseñada para zona de lago.

Considerando la distorsión correspondiente al estado límite de servicio ( $0.006$ ) marcada en NTCs-2003, las demandas estructurales del edificio de 12 niveles aún está por debajo de este valor para un período de retorno  $T_R = 50$  años para eventos simulados provenientes de las diferentes zonas sísmicas y para los tres períodos estructurales mencionados.

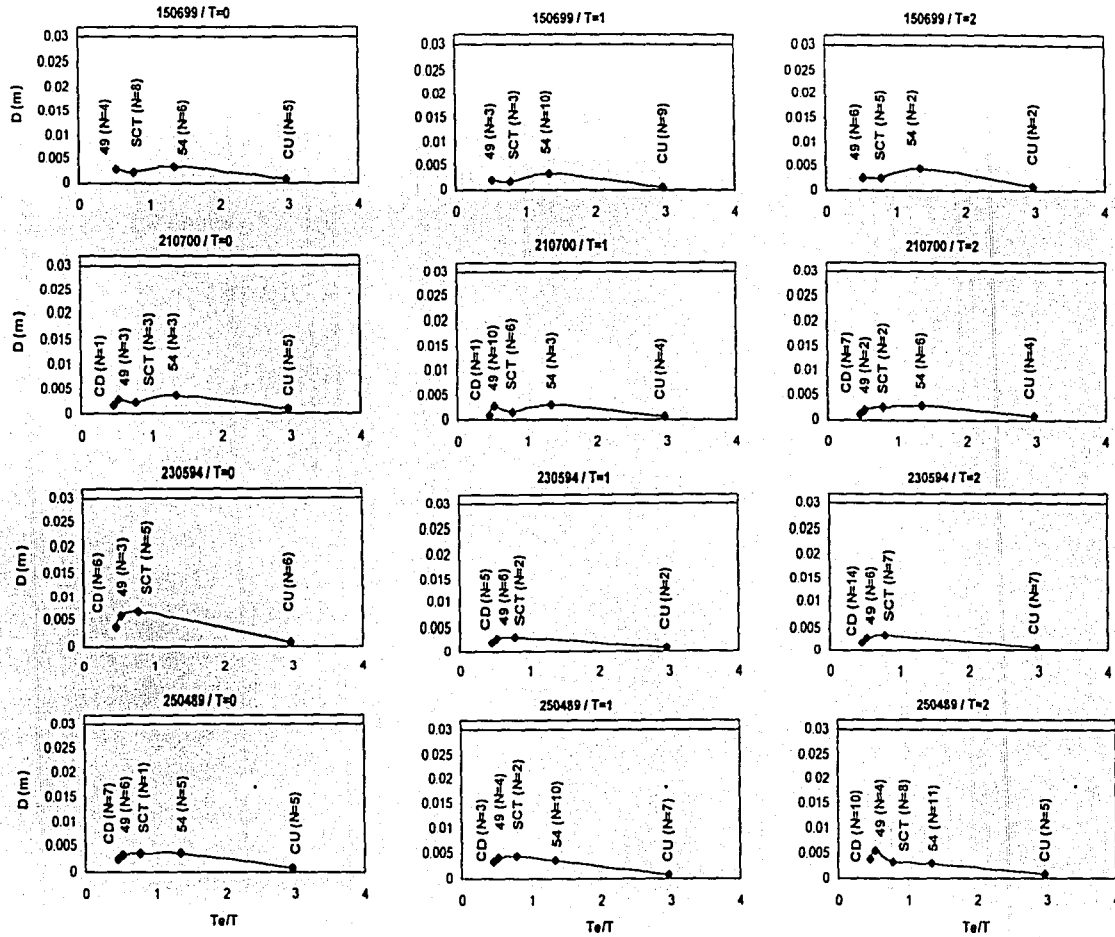


Figura 5.8 Distorsiones asociadas a un periodo de retorno de 50 años y número de acelerogramas en diferentes sitios del valle de México

TESIS PARA DEPOSITO

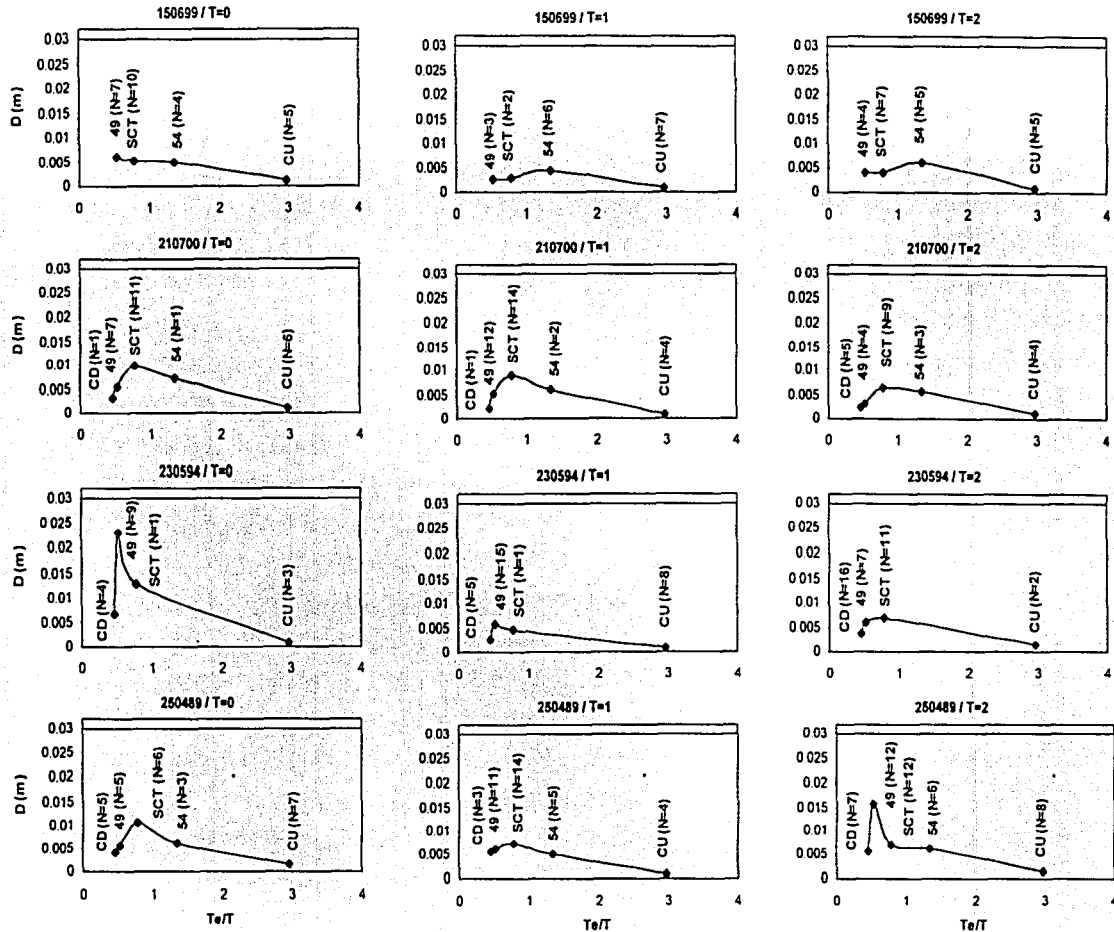


Figura 5.9 Distorsiones asociadas a un periodo de retorno de 125 años y número de acelerogramas en diferentes sitios del valle de México

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN INGENIERIA Y CIENCIAS  
 UNAM

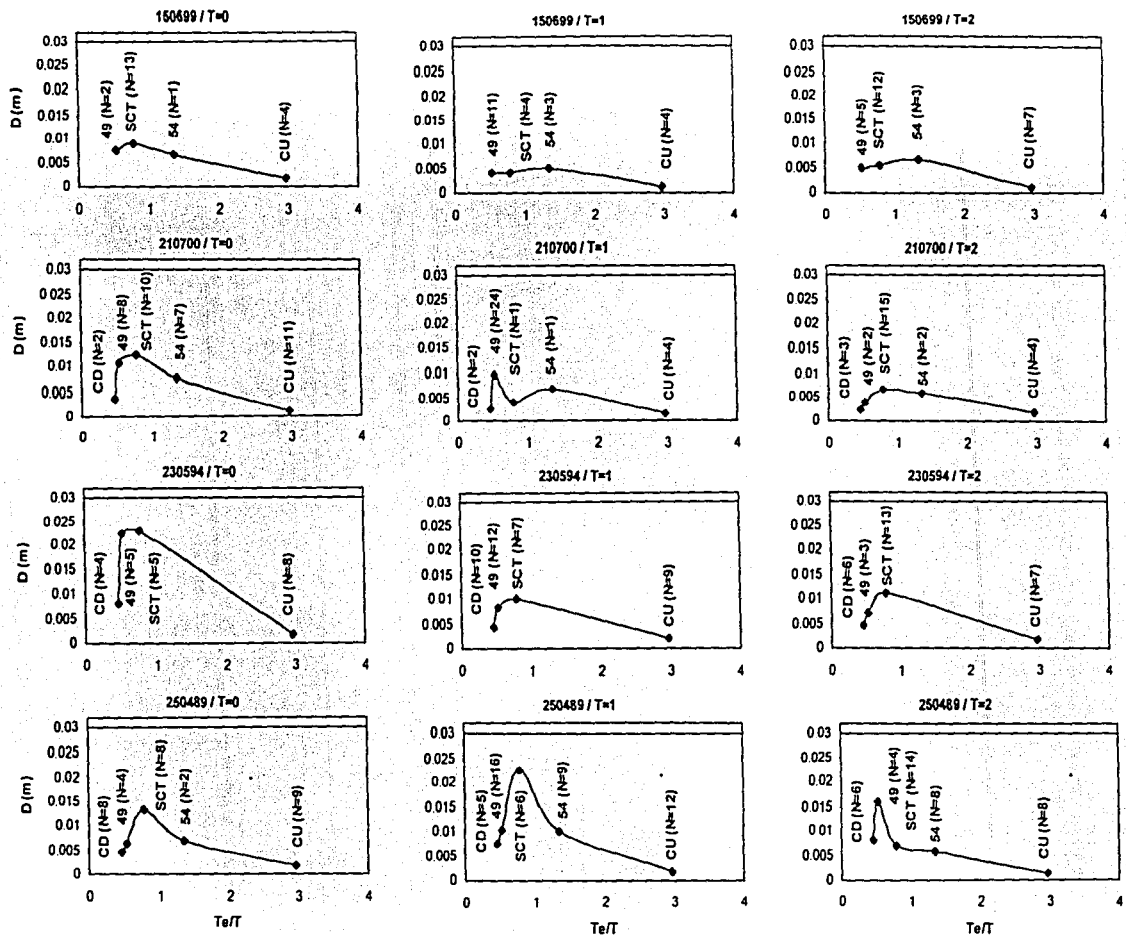


Figura 5.10 Distorsiones asociadas a un periodo de retorno de 200 años y número de acelerogramas en diferentes sitios del valle de México

TITULO  
 FALLA DE OROZQUI  
 1988

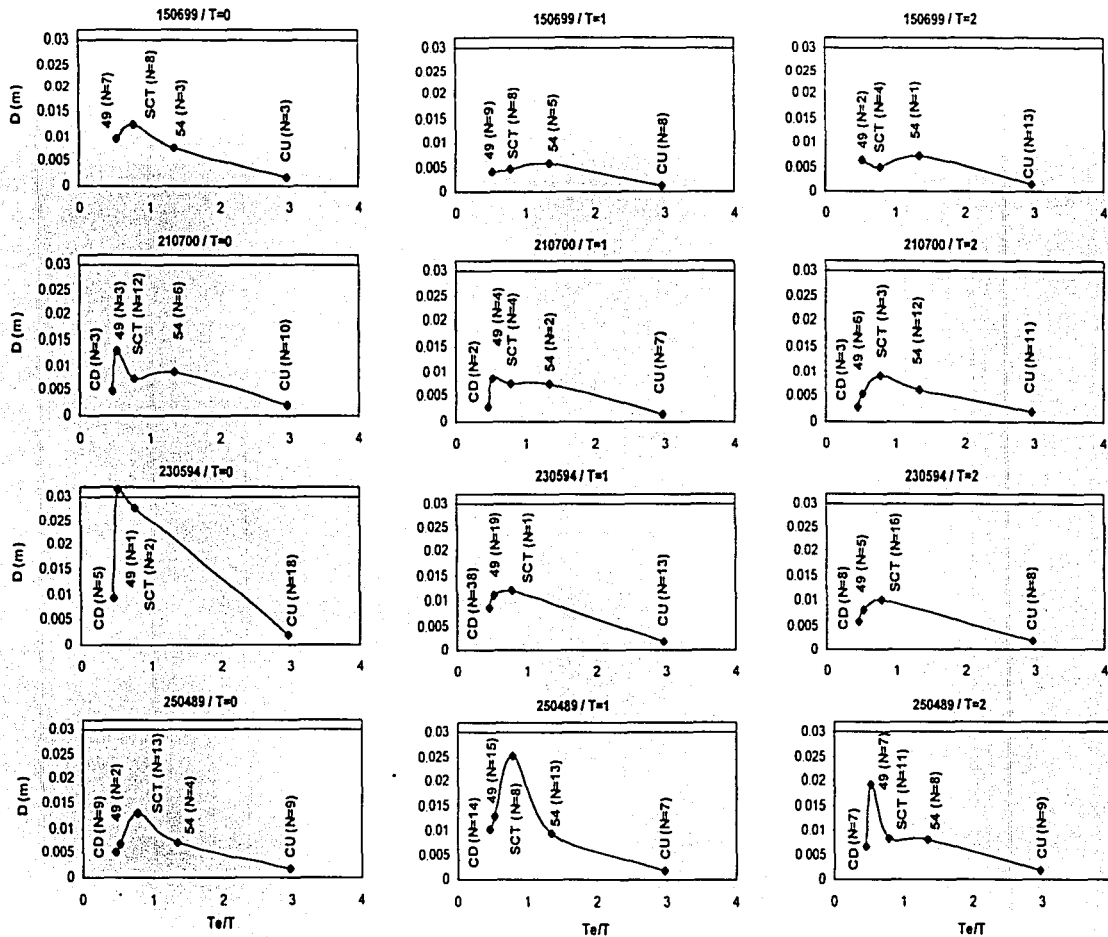


Figura 5.11 Distorsiones asociadas a un período de retorno de 250 años y número de acelerogramas en diferentes sitios del valle de México

INSTITUTO VULNERABILIDAD  
 Y DISEÑO SISMICO

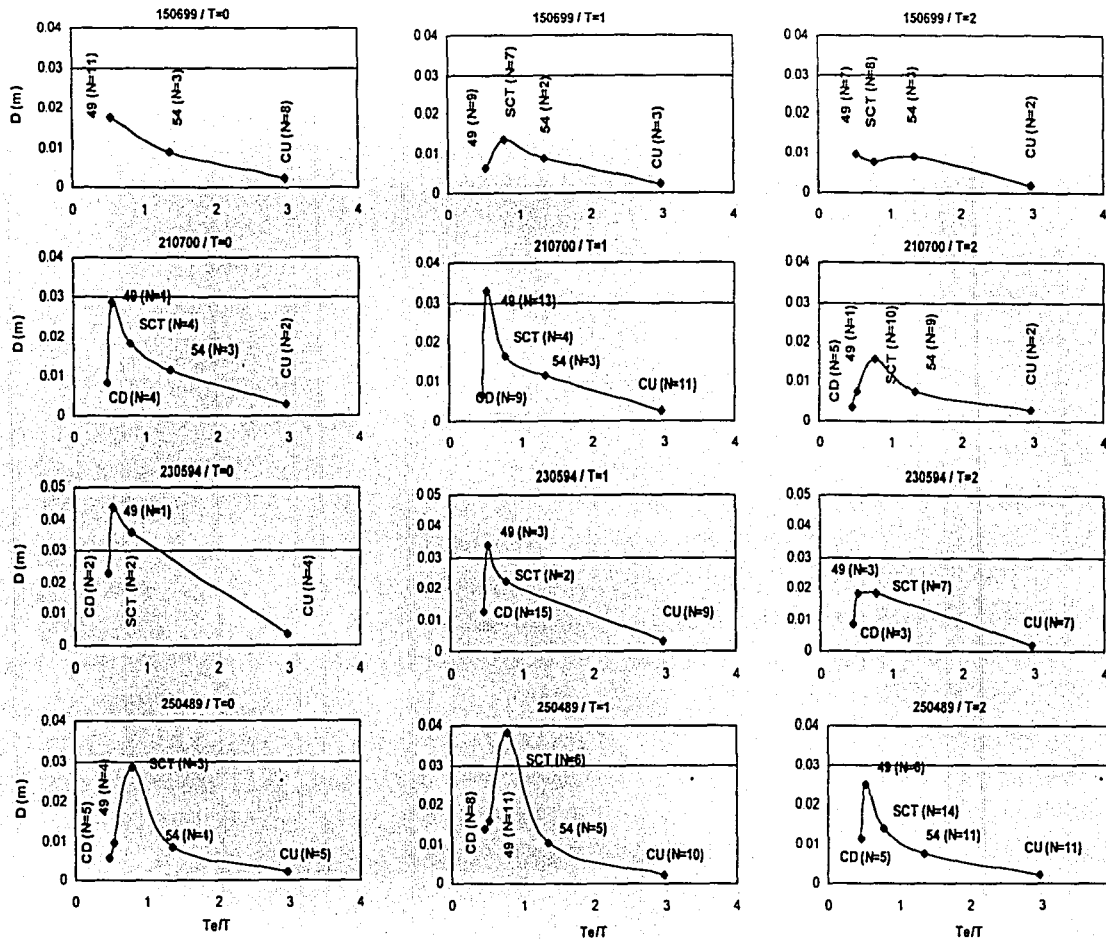


Figura 5.12 Distorsiones asociadas a un periodo de retorno de 475 años y número de acelerogramas en diferentes sitios del valle de México

En las figuras se puede apreciar que se presenta una línea recta que representa el valor de la distorsión para el estado último de servicio (0.03) según las NTCS-2003, considerado dentro del numeral A.4 en la revisión de desplazamientos laterales para sistemas estructurales compuestos por marcos dúctiles de concreto reforzado ( $Q = 3$  ó  $4$ ); para períodos de retorno por encima de 250 años se observa que la estructura ya puede presentar distorsiones superiores a este valor, es el caso del sitio 49, para un  $T = 0$  segundos y simulaciones provenientes de la zona de *profundidad Intermedia Oeste*. Para 475 años de frecuencia de ocurrencia se pueden alcanzar incluso distorsiones de 0.04 o mayores.

En las figuras 5.13 a 5.16, se presentan para las diferentes fuentes sísmicas, las distorsiones alcanzadas por el quinto nivel de la estructura asociándolas a las intensidades encontradas del EPU para los diferentes sitios de interés del valle de México, para eventos provenientes de diferentes zonas sísmicas con diferentes períodos de retorno. En estas figuras se muestran los diferentes puntos correspondientes a una intensidad calculada, cada uno de ellos correspondiente a un caso en particular evaluado para las diferentes simulaciones asociadas a una cierta intensidad.

Las observaciones representadas por círculos indican la distorsión calculada para simulaciones cuya aceleración es la del suelo ( $T = 0$ ) en el sitio de interés, y las representadas por triángulos están asociadas a intensidades para un período estructural de 1 segundo del EPU y los trapecios representan las solicitaciones en el quinto nivel cuando la estructura se somete a simulaciones que producen la intensidad correspondiente del EPU en un período estructural de 2 segundos.

Podemos observar cómo en todos los casos las demandas que presenta la estructura son mayores cuando consideramos las diferentes simulaciones asociadas a la aceleración del suelo, o lo que es lo mismo, la intensidad del EPU del sitio considerando  $T = 0$  segundos independientemente de la zona sísmica para la cual se obtuvieron las simulaciones. Según lo observado entonces sería conservador, si consideramos diferentes simulaciones provenientes de una zona sísmica, someter nuestra estructura a eventos cuya intensidad espectral para un período estructural de 0 segundos esté asociada a aquella del EPU del sitio, pues para este caso aparentemente se cubrirían los demás períodos estructurales  $T$ . También se puede ver que para el sitio CU, las distorsiones calculadas considerando eventos tanto de subducción como de falla normal, tienden a ser muy próximas independientemente del período estructural elegido. Para confirmar estas afirmaciones sería necesario someter la estructura a eventos relacionados a las intensidades de otros períodos estructurales del EPU y ver si para ellos las distorsiones aún se encuentran por debajo de las obtenidas para la aceleración del suelo en el sitio y si en CU se sigue presentando esta constante.

Para apreciar cómo es el comportamiento de la estructura analizada, asociando las demandas a una intensidad, en los diferentes sitios y para los diferentes períodos estructurales, se presenta la figura 5.17, que son las superficies generadas a partir de las distorsiones calculadas con las regresiones obtenidas para cada caso (zona sísmica y sitio). Las diferentes superficies se obtuvieron empleando el programa SURFER (V6.01). De estas superficies obtenidas para cada zona sísmica y para cada período estructural, se ve como en casi todos los casos las distorsiones son mayores a medida que la relación del período estructural y el período del suelo ( $T_{est} / T_S$ ) tienden a cero, es decir para sitios en terreno blando. La relación  $T_{est} / T_S$  para los diferentes sitios donde se analizó la estructura se pueden ver en la tabla 5.2, en esta se encuentran organizados según la zona dentro del valle de México donde están ubicadas, de terreno firme a terreno blando.

Tabla 5.2 Relación  $T_{est} / T_S$  para los diferentes sitios donde se analizó la estructura de 12 niveles.

Terreno	firme		blando		
	Estación	CU	54	SCT	49
$T_S$	0.5	1.1	1.9	2.8	3.2
$T_{est} / T_S$	2.97	1.35	0.78	0.53	0.46

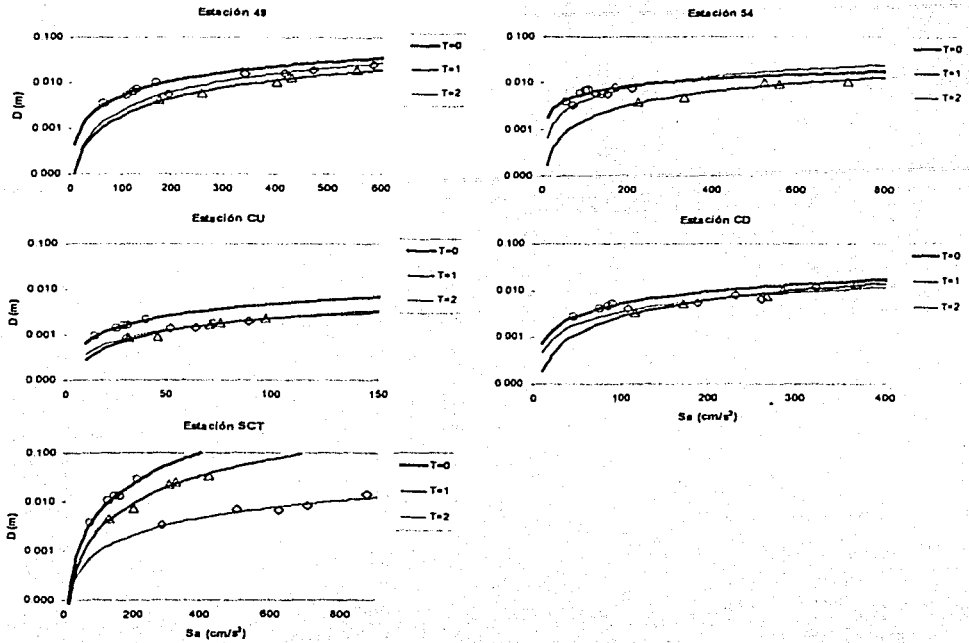


Figura 5.13 Distorsiones vs. intensidades empleando como FGE el evento del 25 de abril de 1989

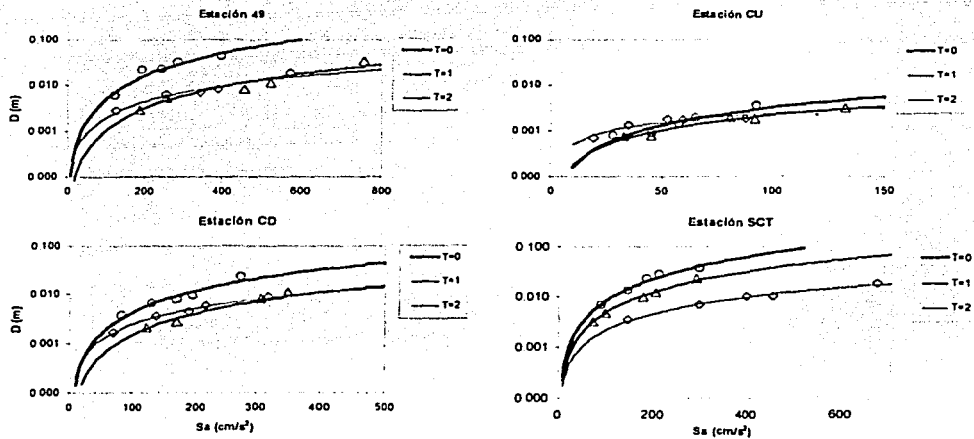


Figura 5.14 Distorsiones vs. intensidades empleando como FGE el evento del 23 de mayo de 1994



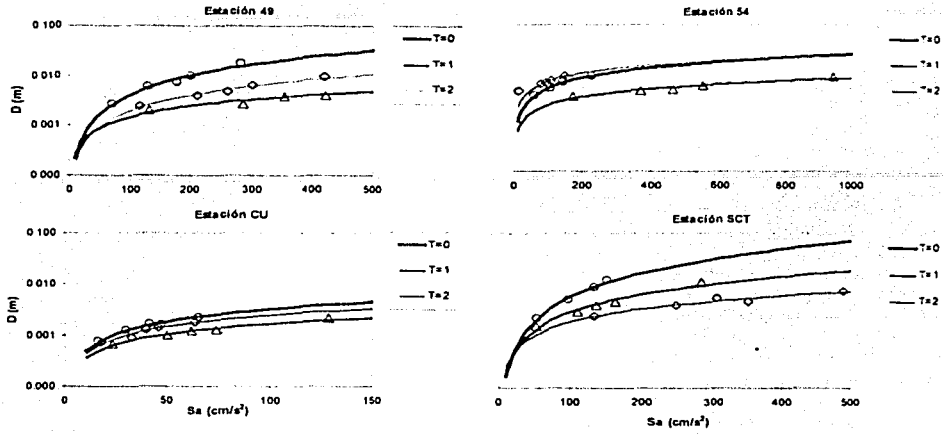


Figura 5.15 Distorsiones vs. intensidades empleando como FGE el evento del 15 de junio de 1999

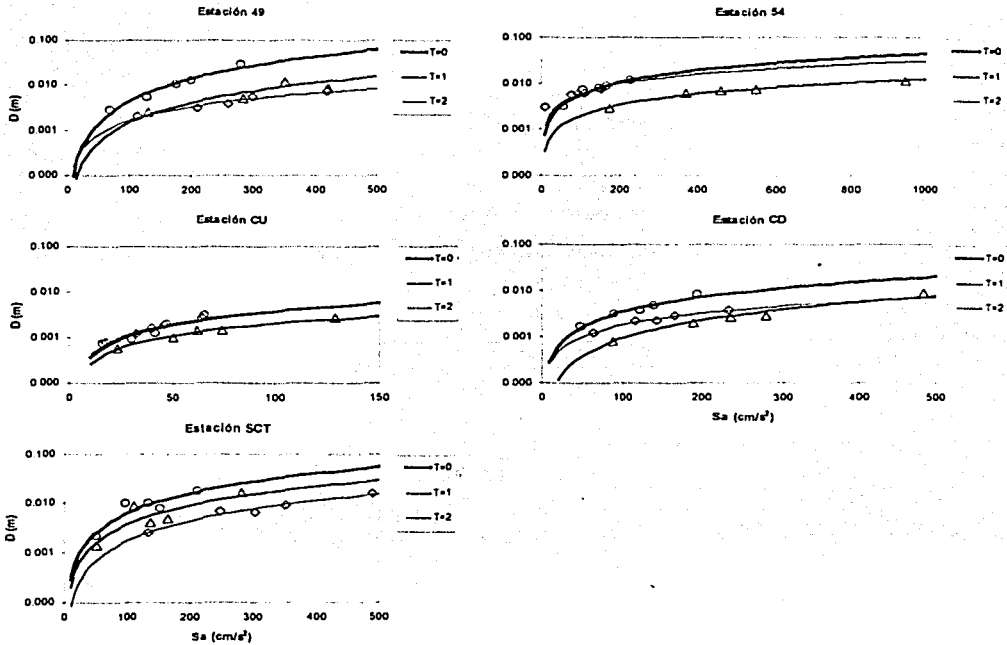


Figura 5.16 Distorsiones vs. intensidades empleando como FGE el evento del 21 de julio de 2000

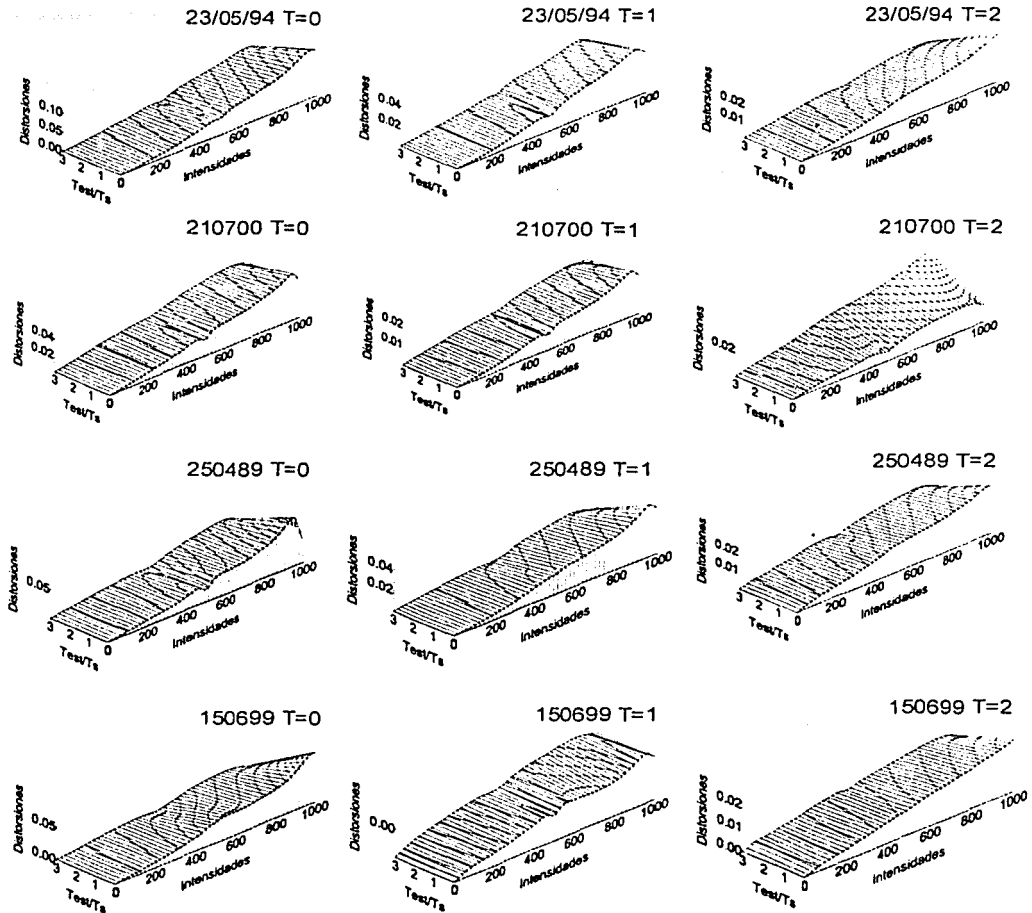


Figura 5.17 Distorsiones obtenidas para una estructura de 12 niveles, para diferentes sitios del valle de México y zonas sísmológicas. Las intensidades son aceleraciones en  $\text{cm/s}^2$ .

El único caso para el cual el comportamiento antes descrito cambia es para las distorsiones obtenidas en la estructura, en el quinto nivel, cuando esta se ve sometida a eventos provenientes de la zona de *profundidad intermedia centro* para el evento del 21 de julio; en este caso se observa que a medida que las intensidades aumentan y a su vez llevamos la estructura a terreno blando las distorsiones tienden a reducirse, caso contrario cuando evaluamos el comportamiento de esta en sitios de terreno firme. También se puede apreciar cómo para todos los casos, para cualquiera de las zonas sísmológicas consideradas, las distorsiones son máximas cuando la estructura se ve

sometida a acelerogramas cuyas intensidades están asociadas a la ordenada espectral del EPU para un período  $T = 0$  segundos.

Se puede apreciar también que para todos los casos, excepto para el mencionado en el párrafo anterior, las distorsiones alcanzan su máximo cuando tanto el período de la estructura como del suelo se acercan, estas superficies muestran sin embargo que el máximo está cuando la relación  $T_{est} / T_s = 0$ , esto es debido a que la regresión empleada extiende la malla según la disposición de puntos cercanos y como no se tienen valores de distorsiones para las diferentes intensidades para relaciones  $T_{est} / T_s < 0.46$  (estación CD), se extiende simplemente la malla llevando la tendencia de la superficie. Lo que se esperaría entonces en estas superficies sería que a medida que las relaciones de períodos del sitio y estructura se alejan de la unidad las distorsiones se reduzcan, es decir a medida que me voy hacia períodos en terreno blando mayores o hacia períodos cercanos del suelo ( $T = 0$  segundos) en terreno firme, esto considerando el comportamiento observado en las figuras 5.8 a 5.12. Lo importante de ellas simplemente es mostrar la tendencia de las distorsiones a aumentar a medida que se incrementan las intensidades y a medida que nuestra estructura se lleva a un sitio con un período similar.

Para poder obtener estas superficies a partir, no de las regresiones obtenidas, sino de una nube de puntos representativa de tal forma que la regresión considerada interpole correctamente, sería necesario considerar mas casos para evaluar el comportamiento de nuestra estructura: simulaciones asociadas a otras intensidades provenientes de las diferentes zonas sísmicas y cuyas intensidades estén asociadas a diferentes períodos estructurales del EPU para otros sitios dentro del valle de México.

#### Varianzas y número de acelerogramas:

Como se dijo antes el número de acelerogramas  $N$  para representar correctamente la respuesta de una estructura ante un evento que se produce en alguna zona sísmica se asocia a la varianza del logaritmo natural de las distorsiones en un nivel, en nuestro caso el quinto que es donde las demandas son mayores. Para la estructura de 12 niveles que se evalúa, se calcula esta varianza con las expresiones (5.13), (5.14) y (5.15) que al remplazarlas en la expresión (5.1) da como resultado cuántos acelerogramas se requieren si se considera un error del estimador del 10%.

Para cada una de las simulaciones obtenidas en cada caso particular ( $T_R$ ,  $T$ , sitio y zona sísmica) se obtuvieron las demandas de desplazamientos en cada nivel de la estructura, y de ahí se pudieron obtener las distorsiones medias  $d$  de entrepiso con las cuales se procede a encontrar la mediana  $D$  y de ahí la desviación  $\sigma_{ln D}$ . Toda esta información se agrupó en la figura 5.18, donde se muestra qué valores toman las varianzas a medida que las intensidades incrementan; la tendencia que se aprecia es que por debajo de 200  $\text{cm/s}^2$  las varianzas crecen al aumentar las intensidades y por encima de este valor la varianza tiende a un valor de 0.1.

En la figura 5.18 se encuentran todos los casos analizados dependiendo de la zona sísmica que se considere afecta la estructura de 12 niveles, se reúne la información para las intensidades asociadas a los tres períodos estructurales considerados y se obtienen regresiones para cada uno de ellos. Se puede apreciar que las regresiones para cada grupo de observaciones en todos los casos, para los cuatro eventos provenientes de diferentes zonas sísmicas, son muy semejantes independientemente del período estructural para el cual se obtuvieron simulaciones; debido a ello obtenemos una regresión media que esta representada por la curva con mayor espesor y se muestra la expresión general que me relaciona para cada zona sísmica la varianza con la intensidad.

En la figura 5.19 se presentan las curvas medias para las tres zonas que afectan nuestra estructura y se ve cómo la curva correspondiente a la zona de *Ometepéc* presenta mayores ordenadas respecto a aquellas zonas de *Profundidad Intermedia Centro* y *Oeste* cuyos eventos son de origen de falla normal. Las regresiones medias obtenidas para las zonas de *Profundidad*

*Intermedia Centro y Oeste* son prácticamente idénticas por lo cual quedaría una expresión general para representar ambas zonas para nuestra estructura de 12 niveles.

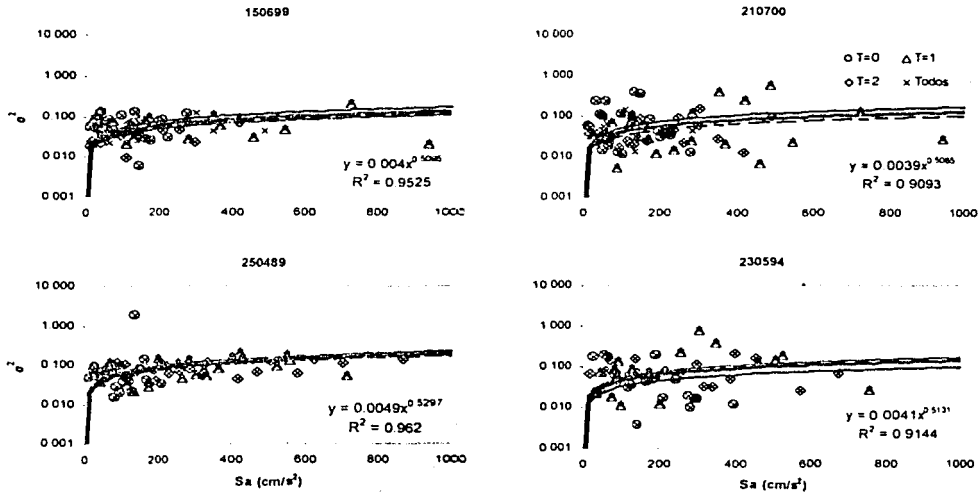


Figura 5.18 Varianzas vs. intensidades para los diferentes sitios del valle de México donde se estudió la estructura y para  $T = 0, 1$  y 2 segundos

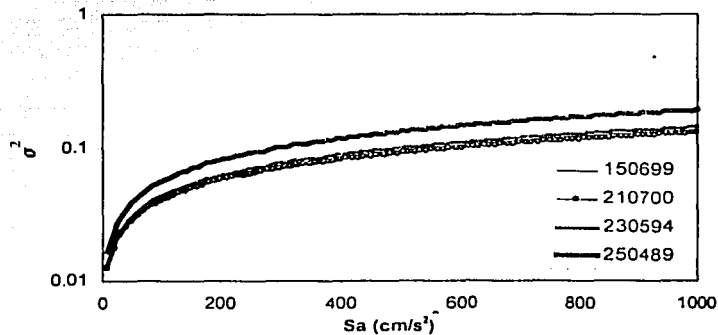


Figura 5.19 Curvas medias de varianzas vs. intensidades para las diferentes zonas sísmológicas consideradas

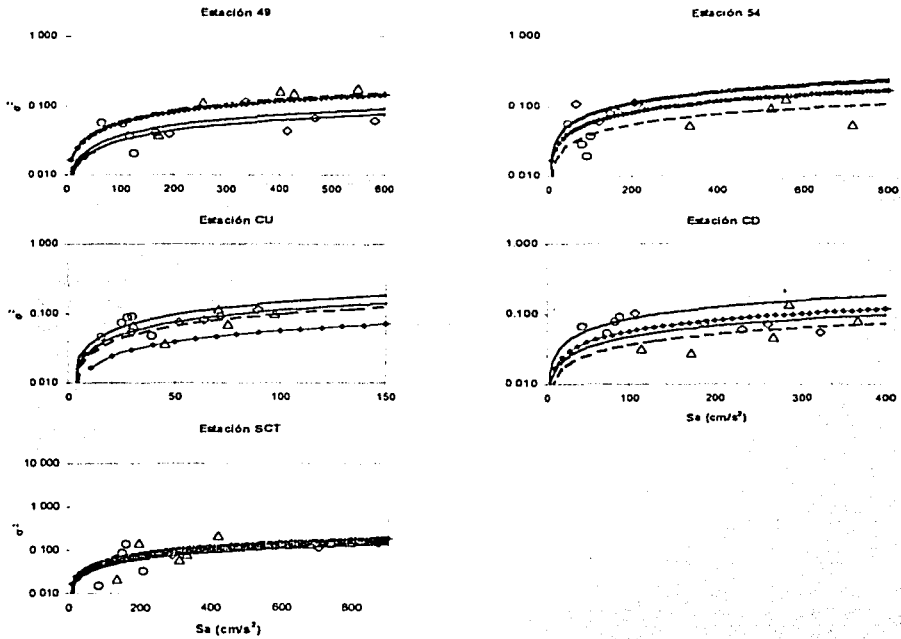


Figura 5.20 Varianza vs. intensidades empleando como FGE el evento del 25 de abril de 1989

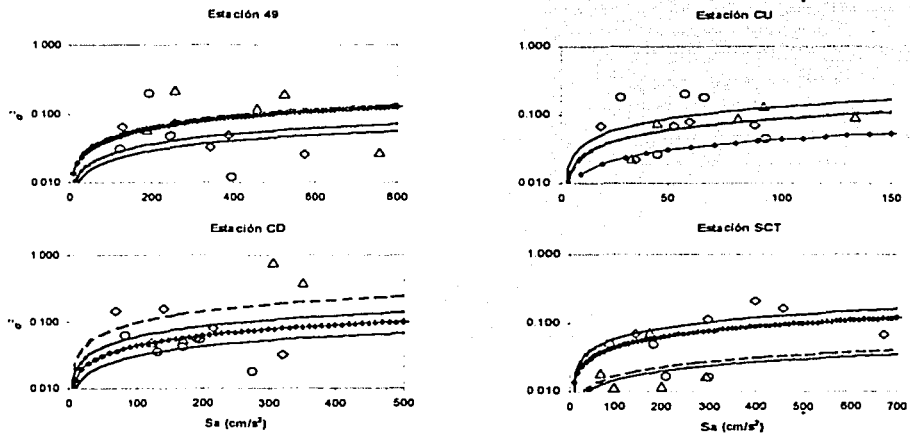
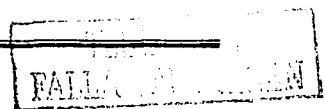


Figura 5.21 Varianza vs. intensidades empleando como FGE el evento del 23 de mayo de 1994



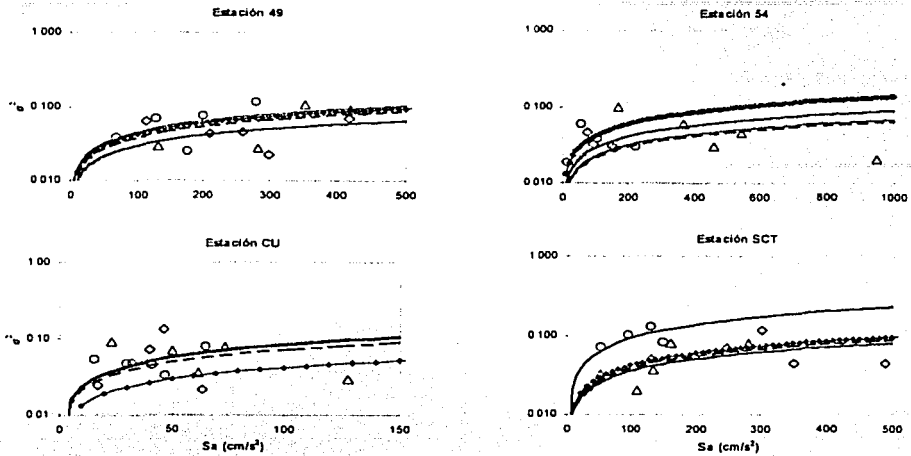


Figura 5.22 Varianza vs. intensidades empleando como FGE el evento del 15 de junio de 1999

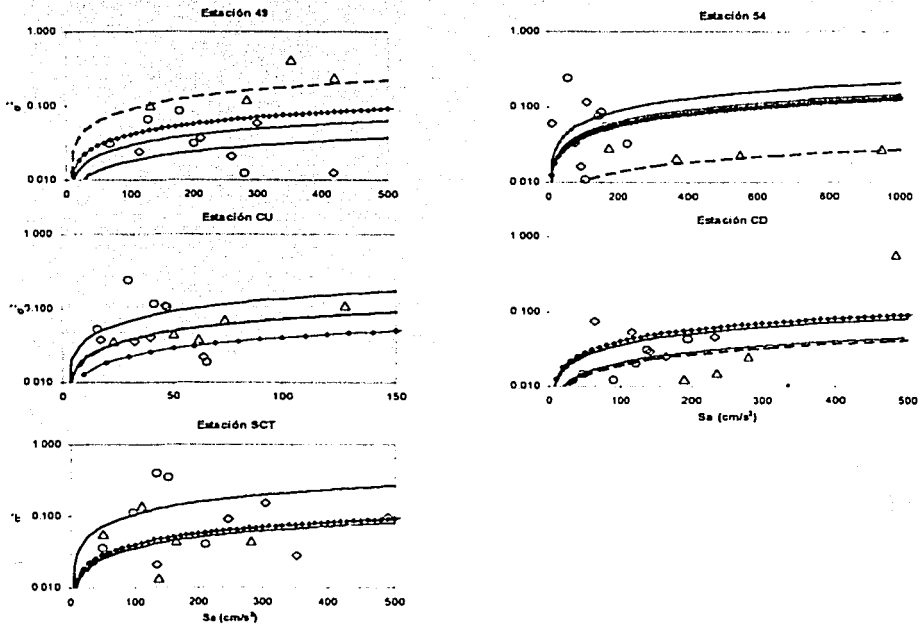
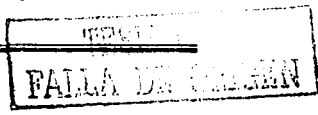


Figura 5.23 Varianza vs. intensidades empleando como FGE el evento del 21 de julio de 2000



En las figuras 5.20 a 5.23 se presenta para cada sitio, considerando cada zona sísmica, las diferentes regresiones obtenidas para las observaciones obtenidas de analizar la estructura para diferentes simulaciones cuyas intensidades están asociadas a un período estructural  $T = 0, 1$  ó  $2$  segundos; en las mismas figuras se grafican las expresiones generales propuestas para cada zona y se puede ver que en la mayoría de los casos éstas cubren aquéllas obtenidas en cada sitio en particular. Se encuentran casos como el de el sitio CU que para todos los casos presenta que las observaciones para la aceleración del suelo y por tanto su regresión está por encima de la general considerando según la zona, es por ello que se emplearía la expresión obtenida para la regresión relacionada a  $T = 0$ . Esto mismo se puede observar para sitios como CD y SCT cuando comparamos la expresión general obtenida para la zona de *Profundidad Intermedia Oeste*, para las diferentes simulaciones obtenidas empleando como FGE el sismo del 23 de mayo de 1994. Podemos sin embargo emplear para determinar la varianza, o en su defecto la desviación estándar en un sitio y para un período estructural, la expresión general que en la mayoría de los casos se convierte en una envolvente de todas las observaciones pues los valores obtenidos no varían mucho considerando que existen incertidumbres mayores en todo este proceso.

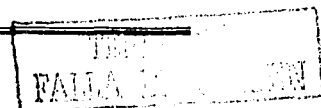
En la figura 5.24 se puede ver de mejor forma cómo es el comportamiento de la varianza asociado a las diferentes intensidades, en los diferentes sitios y para los diferentes períodos estructurales. Estas superficies generadas a partir de las regresiones encontradas para cada caso (zona sísmica y sitio muestran la tendencia de las varianzas y por lo tanto del número de acelerogramas a incrementar conforme las intensidades aumentan; respecto al eje  $T_{est} / T_s$  ocurre que las varianzas se reducen a medida que esta relación es menor, es decir, a medida que nos acercamos a terreno blando.

Para hacer afirmaciones más concretas al respecto sería necesario obtener simulaciones para otros sitios, tanto en terreno firme como transición y lago, además de considerar para ellas intensidades asociadas a otros períodos estructurales del EPU según sea el caso considerando incluso el período del sitio.

Conociendo estas expresiones generales para las varianzas y considerando la ecuación (5.1) se obtendría para cada zona, período de retorno (asociado a las intensidades), sitio y período estructural el número de acelerogramas  $N$  buscado. De igual forma que para el caso anterior de las varianzas, se presentan en la figura 5.25 las diferentes regresiones obtenidas de todas las observaciones, primero para los períodos estructurales considerados y luego obteniendo una regresión media que nos dé una expresión general para cada zona sísmica que pueda representar riesgo para nuestra estructura. En la figura 5.26 se observa cómo considerando las regresiones generales para las diferentes zonas sísmológicas el comportamiento del número de acelerogramas conforme incrementa la intensidad es prácticamente mismo, independientemente si las simulaciones se obtienen empleando como FGE eventos ya sea de la zona de *Ometepéc*, *Profundidad Intermedia Centro* o *Oeste*.

También, en las figuras 5.27 a 5.30, se presenta para cada sitio y dependiendo de la zona sísmica las regresiones obtenidas para cada uno de los períodos estructurales considerados en el estudio; en las mismas figuras se grafican las regresiones generales obtenidas para cada zona sísmológica con el fin de ver si cubre todos los casos. Se observa que la regresión general en la mayoría de los sitios cubre las ordenadas asociadas a las diferentes intensidades, sin embargo en algunos casos, como en CU la regresión relacionada a la aceleración del suelo es decir para un período estructural  $T = 0$  demanda un mayor número de simulaciones. Al igual que para las varianzas estas expresiones generales para el número de simulaciones pueden dar una buena referencia para encontrar que número de acelerogramas se requiere para representar de forma adecuada la respuesta de una estructura ante un evento proveniente de una zona sísmica.

Se puede apreciar cómo para todos los casos el número de simulaciones varía entre 1 y 30 acelerogramas, alcanzando este último valor para eventos cuyas intensidades superen los  $800 \text{ cm/s}^2$  aproximadamente; esto considerando las regresiones para todas las observaciones obtenidas de considerar simulaciones provenientes de una zona en particular (ver figura 5.25).



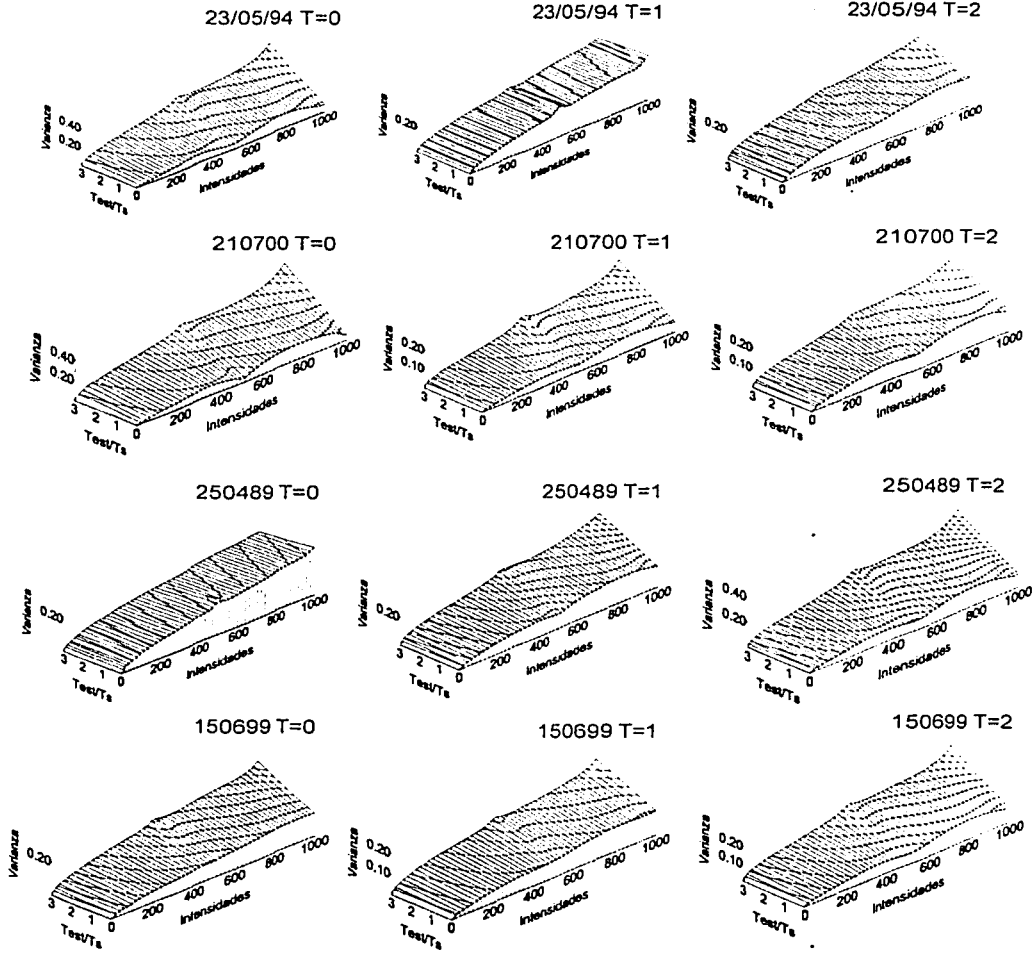


Figura 5.24 Varianzas obtenidas para una estructura de 12 niveles, para diferentes sitios del valle de México y zonas sísmológicas. Las intensidades son aceleraciones en  $\text{cm/s}^2$ .

Finalmente se podría encontrar una expresión como la (5.1) que permitiera encontrar el número de acelerogramas provenientes de una zona sísmica, considerando la varianza del logaritmo natural de las distorsiones y que dependiera de un factor  $F$  asociado al número de niveles de la estructura como se muestra en la expresión 5.16. Para ello se deberían probar diferentes estructuras, de diferentes número de niveles en varios sitios del valle de México (terreno firme, transición y

TESIS NO VALEN  
 SIN EL SELLO DE  
 CONTROL DE CALIDAD

TESIS NO VALEN  
 SIN EL SELLO DE  
 CONTROL DE CALIDAD



blando), para intensidades asociadas a otros períodos estructurales incluyendo el del sitio del EPU y para diferentes zonas sísmológicas.

$$N = F \cdot \frac{\sigma_{LnD}^2}{e^2} \quad (5.16)$$

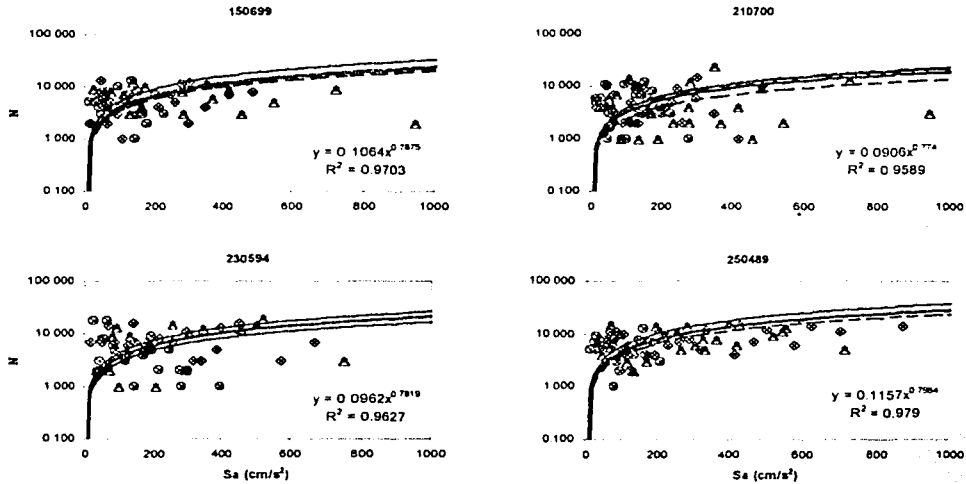


Figura 5.25 Número de acelerogramas vs. intensidades para los diferentes sitios del valle de México donde se estudió la estructura y para  $T = 0, 1$  y 2 segundos

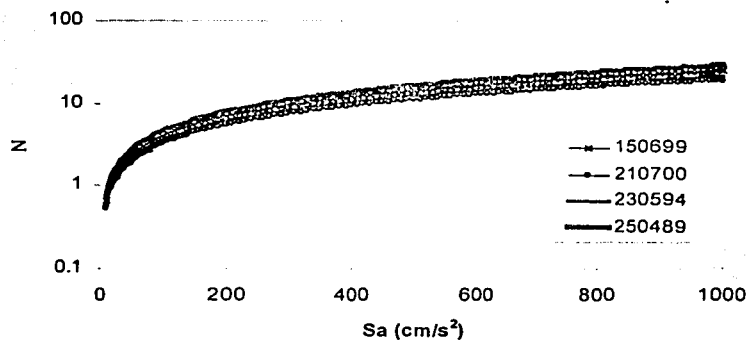


Figura 5.26 Curvas medias del número de acelerogramas vs. intensidades para las diferentes zonas sísmológicas consideradas

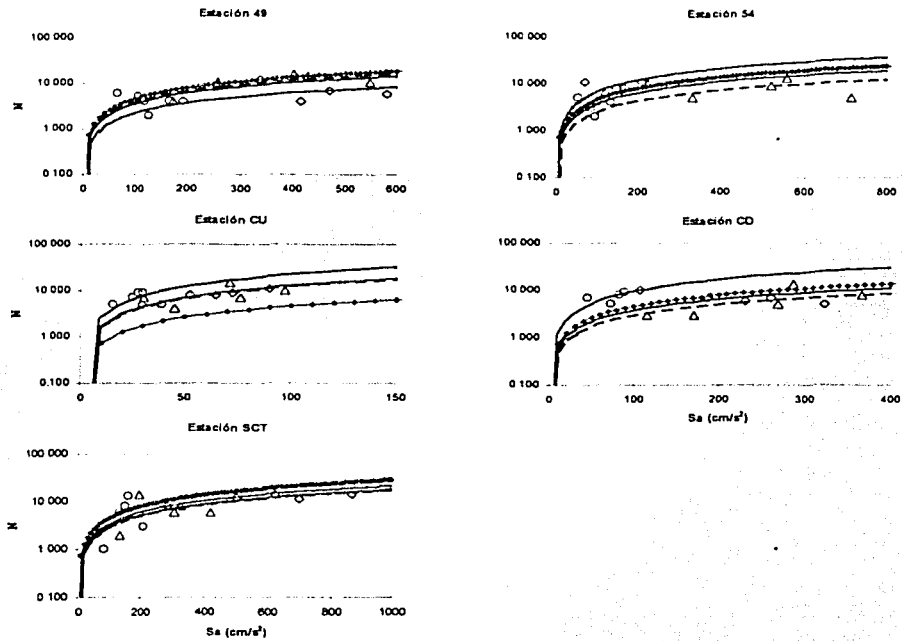


Figura 5.27 Número de acelerogramas vs. intensidades empleando como FGE el evento del 25 de abril de 1989

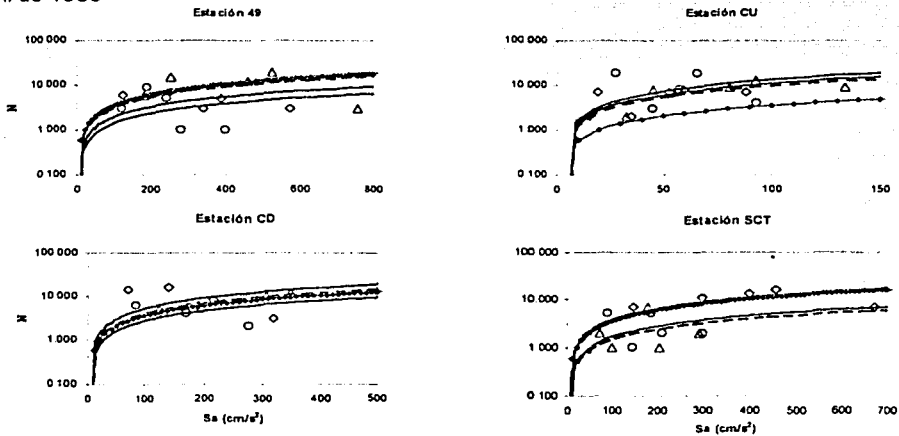


Figura 5.28 Número de acelerogramas vs. intensidades empleando como FGE el evento del 23 de mayo de 1994

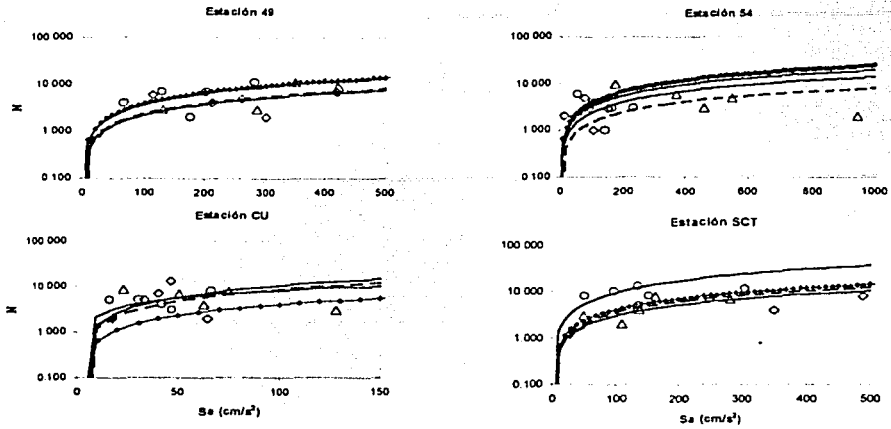


Figura 5.29 Número de acelerogramas vs. intensidades empleando como FGE el evento del 15 de junio de 1999

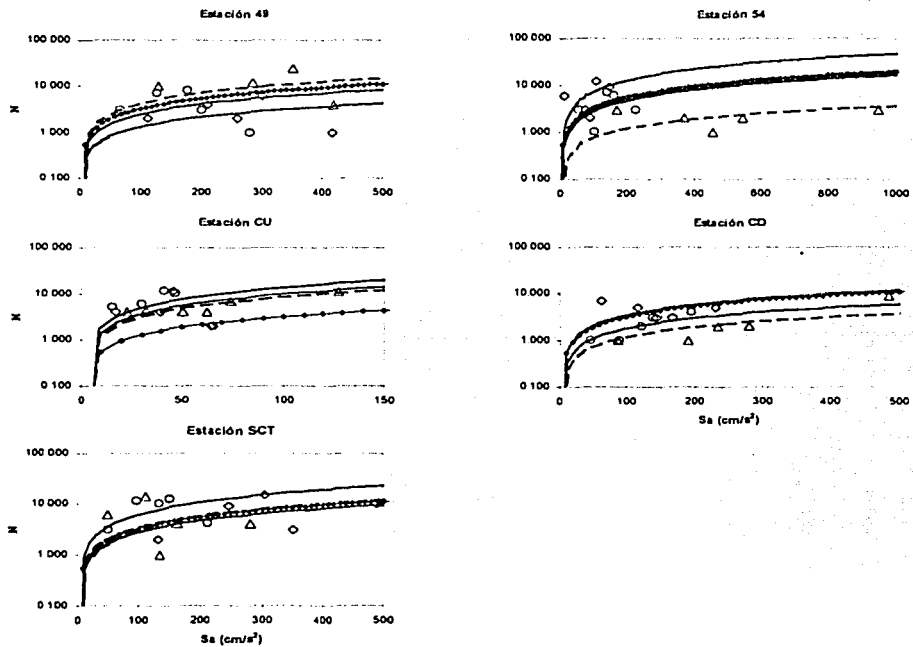


Figura 5.30 Número de acelerogramas vs. intensidades empleando como FGE el evento del 21 de julio de 2000

### 5.2.2 Determinación de la confiabilidad estructural

En este numeral se plantea el análisis de confiabilidad para el edificio de marcos que venimos estudiando, se determina su confiabilidad estructural y se busca qué zona sísmica exige mayores demandas a la estructura cuando está ubicada en un sitio particular, lo cual permitirá determinar el número de acelerogramas correspondiente a esa fuente.

**Paso 1:** Se determina la confiabilidad sísmica estructural representada mediante las funciones de peligro sísmico de las demandas de construcciones dada por la expresión (5.2), para los diferentes sitios donde la estructura fue analizada y para las tres diferentes zonas tanto de subducción como de origen de falla normal consideradas, esto se expresa así:

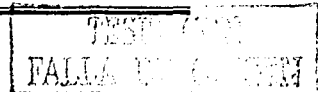
$$v_D(d) = \int -\frac{\partial v_y(y)}{\partial y} \dots P(D \geq d | y) \dots dy \quad (\text{Esteva y Ruiz, 1989})$$

**Paso 2:** Las distorsiones de entrepiso (D) se ajustan con la expresión (5.8) para el sitio de interés. En las figuras 5.13 a 5.16 se observaron los diferentes ajustes de este tipo y se vio la tendencia de aumentar las distorsiones conforme a las intensidades como se explicó anteriormente. Los parámetros *a* y *b* que definen las regresiones para los diferentes casos se presentan en la tabla 5.3. En esta tabla se presenta para cada evento empleado como FGE, considerando tres períodos estructurales, los coeficientes que definen el comportamiento de las distorsiones en los diferentes sitios donde la estructura de 12 niveles fue analizada.

Tabla 5.3 Coeficientes para el ajuste de las distorsiones (D) en los diferentes sitios para una regresión de la forma  $D = a$  (intensidad)<sup>b</sup>.

Sitio	T	15/06/99		21/07/00		23/05/94		25/04/89	
		a	b	a	b	a	b	a	b
49	0	0.000012	1.272973	0.000002	1.658597	0.000002	1.661189	0.000039	1.066764
	1	0.000049	0.741944	0.000002	1.480244	0.000001	1.585816	0.000005	1.295511
	2	0.000015	1.052292	0.000014	1.027859	0.000009	1.160526	0.000005	1.335284
54	0	0.000217	0.684295	0.000099	0.881089	-	-	0.000549	0.517708
	1	0.000187	0.544505	0.000054	0.784633	-	-	0.000017	0.997750
	2	0.000582	0.540280	0.000235	0.702859	-	-	0.000096	0.827198
cu	0	0.000075	0.817667	0.000036	1.012320	0.000008	1.300492	0.000085	0.873322
	1	0.000075	0.673560	0.000034	0.889277	0.000015	1.084293	0.000032	0.927801
	2	0.000076	0.753526	0.000047	0.960965	0.000107	0.678710	0.000060	0.779458
cd	0	-	-	0.000023	1.091836	0.000005	1.465996	0.000105	0.850422
	1	-	-	0.000002	1.303674	0.000002	1.442543	0.000012	1.186629
	2	-	-	0.000036	0.850878	0.000017	1.076750	0.000064	0.868160
sc	0	0.000005	1.534896	0.000012	1.351179	0.000009	1.473803	0.000000	2.072592
	1	0.000015	1.143996	0.000010	1.281636	0.000009	1.365525	0.000000	1.893960
	2	0.000038	0.846715	0.000003	1.369367	0.000013	1.103102	0.000004	1.187340

**Paso 3:** Las desviaciones estándar logarítmicas ( $\sigma_{lnD}$ ) se ajustan con la expresión (5.9) para el sitio de interés. En las figuras 5.20 a 5.23 se observa el tipo de ajuste para las varianzas, que se obtiene de simplemente elevar al cuadrado la desviación estándar; esto se hizo para cada zona sísmica considerando los diferentes sitios donde se evaluó el comportamiento del edificio. En la tabla 5.4 se presentan los coeficientes *c* y *d* que definen las regresiones potenciales obtenidas para las diferentes observaciones dependiendo del período estructural y del sitio.



**Paso 4:** Se resuelve la expresión de la demanda estructural (5.11) ó (5.12) según sea la zona sísmica de interés; la probabilidad condicional de que la distorsión  $D$  exceda un nivel de daño  $d$ , debido a la acción de un sismo de intensidad ( $Y$ ) se obtiene sustituyendo las expresiones (5.7) y (5.10) para  $\Phi$ . Los límites de la integral estarán dados desde  $Y = 0$  hasta  $Y = Y_{MAX}$ ; estos valores son los correspondientes a las tablas 2 y 4 según el sitio, período estructural y zona sísmológica. En las figuras 5.31 a 5.35 se muestra como varía la tasa de demanda estructural conforme se incrementan las distorsiones.

Tabla 5.4 Coeficientes para el ajuste de las varianzas ( $\sigma^2_{in D}$ ) en los diferentes sitios para una regresión de la forma  $\sigma_{in D} = c$  (intensidad)<sup>d</sup>.

Sitio	T	15/06/99		21/07/00		23/05/94		25/04/89	
		c	d	c	d	c	d	c	d
49	0	0.0040	0.5216	0.0030	0.4897	0.0024	0.4695	0.0035	0.5680
	1	0.0035	0.5150	0.0066	0.5626	0.0042	0.5195	0.0049	0.5414
	2	0.0030	0.4929	0.0021	0.4610	0.0028	0.4827	0.0031	0.4983
54	0	0.0025	0.4738	0.0042	0.5145	-	-	0.0058	0.5588
	1	0.0025	0.4686	0.0014	0.4268	-	-	0.0036	0.5091
	2	0.0030	0.4871	0.0053	0.5324	-	-	0.0057	0.5496
cu	0	0.0065	0.5595	0.0092	0.5850	0.0089	0.5849	0.0094	0.5936
	1	0.0059	0.5438	0.0057	0.5520	0.0066	0.5662	0.0071	0.5700
	2	0.0063	0.5583	0.0057	0.5481	0.0066	0.5615	0.0077	0.5780
cd	0	-	-	0.0023	0.4753	0.0031	0.4936	0.0064	0.5605
	1	-	-	0.0021	0.4805	0.0069	0.5727	0.0043	0.5219
	2	-	-	0.0035	0.5038	0.0051	0.5313	0.0034	0.5099
sc	0	0.0068	0.5659	0.0074	0.5752	0.0018	0.4483	0.0039	0.5196
	1	0.0036	0.5128	0.0038	0.5091	0.0020	0.4574	0.0042	0.5281
	2	0.0035	0.5052	0.0034	0.5087	0.0048	0.5346	0.0042	0.5239

En general, el procedimiento para determinar la confiabilidad de nuestro sistema estructural consiste en evaluar las expresiones (5.11) y (5.12) en los límites antes especificados con incrementos pequeños en la intensidad ( $Y$ ), para obtener mayor precisión. Esto se hizo para cada uno de los sitios considerando tres períodos estructurales 0, 1 y 2 además de diferentes zonas sísmicas que pueden poner en peligro la estructura. Se evaluó la confiabilidad estructural para niveles de daño desde 0.002 hasta 0.03 a cada 0.002 para poder definir bien cada una de las curvas.

Podemos observar de las figuras 5.31 a 5.35, tanto para terreno firme como para terreno blando, como la curva de peligro de la demanda estructural decrece a medida que la distorsión o nivel de daño ( $d$ ) que se alcanza aumenta; esto es, cómo la probabilidad de alcanzar un estado límite disminuye conforme el nivel de daño aumenta; esta tendencia se presenta en todos los casos independientemente del período estructural asociado, de la zona sísmica considerada o del sitio.

Tanto para el sitio CU en terreno firme como para los sitios SCT, CD, 49 y 54 en terreno blando, la probabilidad de alcanzar un nivel de daño decrece a medida que este es mayor, esto hasta valores de 0.03, que fue el último para el cual se calculó, en los que la tasa de demanda estructural alcanza valores por debajo de 0.001.

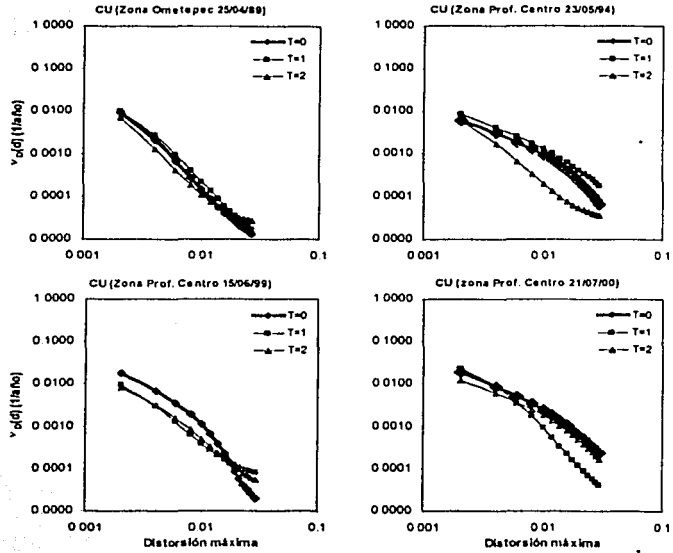


Figura 5.31 Tasas de excedencia estructural en el sitio CU

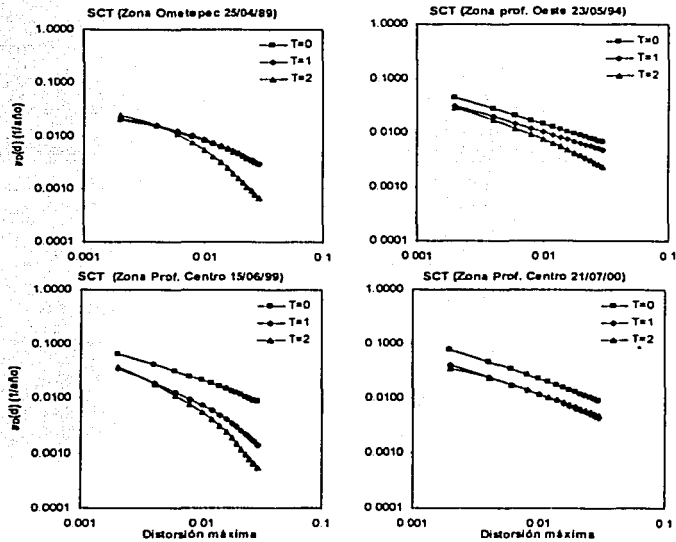


Figura 5.32 Tasas de excedencia estructural en el sitio SCT

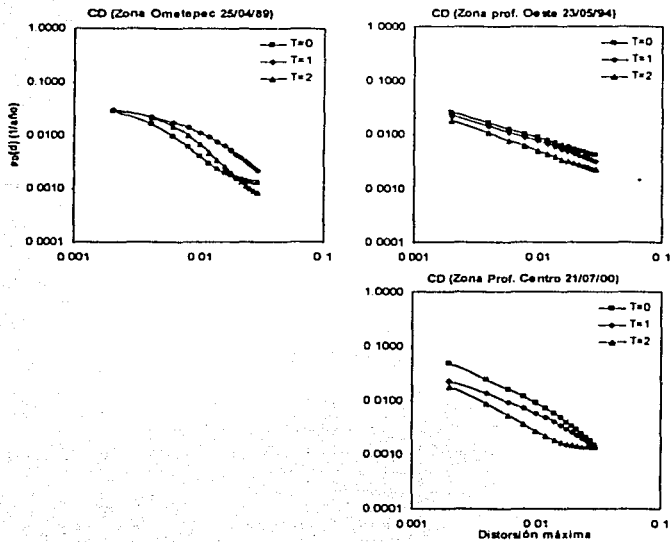


Figura 5.33 Tasas de excedencia estructural en el sitio CD

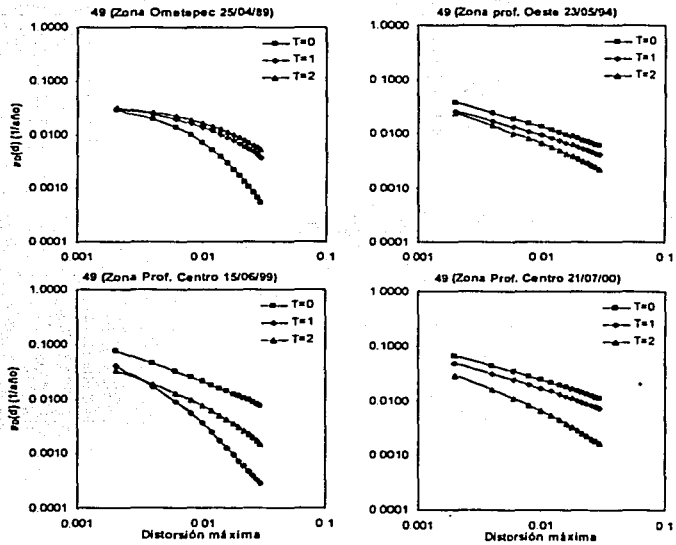
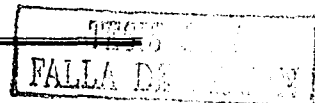


Figura 5.34 Tasas de excedencia estructural en el sitio 49



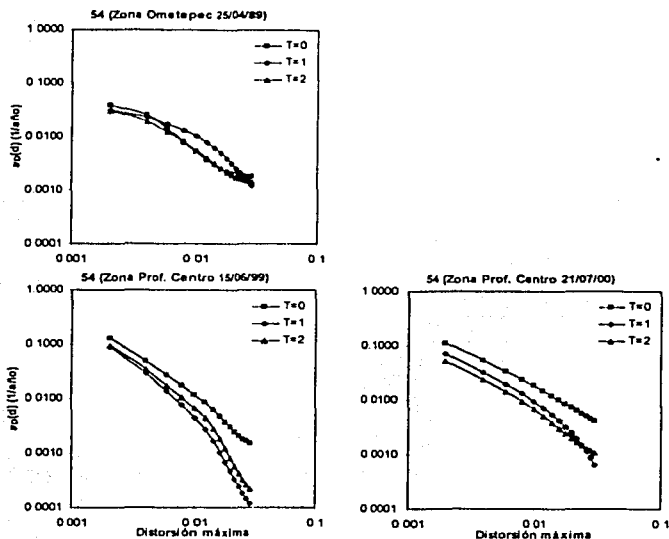


Figura 5.35 Tasas de excedencia estructural en el sitio 54

Las curvas de tasas de demanda estructural mayores, para casi todas las figuras, están asociadas a un período estructural de  $T = 0$  segundos, esto indica que aparentemente las simulaciones relacionadas con la aceleración del suelo, son la que producen en nuestra estructura (12 niveles) mayores demandas en el quinto entrepiso, lo que se traduce en que es mayor, para cada nivel de daño, la probabilidad de excederlo comparándolas con las curvas obtenidas para períodos estructurales de 1 y 2 segundos. Para el sitio CU se observa, aparentemente, como independientemente del período estructural la probabilidad de alcanzar un nivel de daño ( $d$ ) en nuestra estructura es la misma, esto si observamos que las tres curvas en cada caso (para cada zona sísmológica) prácticamente están superpuestas. Estas observaciones se deben reafirmar evaluando el comportamiento de la estructura en diferentes sitios para otros períodos estructurales, incluyendo el correspondiente al sitio de interés.

De estas curvas de tasa de excedencia estructural, para cada sitio, se puede observar qué período estructural y de qué zona sísmica, de donde provendrán eventos futuros asociados a una intensidad particular, se exige mayor demanda a la estructura de 12 niveles, lo que nos permitirá tomar una decisión sobre de donde deben provenir las simulaciones para evaluar el comportamiento de la estructura y qué cantidad se requieren. En nuestro caso probamos una zona de subducción y dos zonas cuyos eventos son de falla normal; de estas curvas de tasas de excedencia estructural podría, agrupando por zonas del mismo origen, elegir cual de ellas me produce mayores demandas en la estructura que se analizó y con lo que se vió sobre el número de simulaciones, elegir cuantos eventos debo tomar de allí para evaluar su comportamiento en un sitio determinado, para una intensidad asociada a un período de retorno. Se debería entonces evaluar el comportamiento de la estructura para varias zonas de donde provengan eventos del mismo tipo (falla normal o subducción), agruparlas y entonces de cada grupo elegir cual demanda más.

En el caso de los sitios CU y CD podemos ver que las mayores demandas para la estructura se producen por eventos que provienen de la zona de *Profundidad Intermedia Oeste*; para los sitios SCT, 49 y 54 la zona que mayores demandas exige a la estructura es la zona de *Profundidad*



*Intermedia Centro*, todo esto si consideramos sismos de falla normal y la curva correspondiente a un período estructural de cero segundos. Para eventos de origen de subducción estos provienen de la zona de *Ometepec* para  $T = 0$  segundos, que es el único caso considerado para este tipo de falla. Lo que se muestra, es que si consideráramos diferentes fuentes que afecten al valle de México y las agrupáramos según sea el mecanismo de falla, para obtener en diferentes sitios las tasas de excedencia estructurales, tendríamos un medio para definir qué zona afecta más la estructura, para que período estructural e incluso para que sitio; de ahí se podría decir para cada una de ellas qué número de acelerogramas son requeridos.

Si comparamos las diferentes zonas sismológicas consideradas para obtener nuestras simulaciones, de las figuras 5.31 a 5.35 podemos decir que el sitio para el cual se presentan las mayores demandas en nuestra estructura, considerando las curvas de un período estructural de cero segundos, es SCT respecto a las zonas de *Ometepec* y de *Profundidad Intermedia Oeste*. Para la zona de *Profundidad Intermedia Centro* la estación 54 presenta mayores tasas de excedencia estructurales para distorsiones máximas de 0.02 tanto cuando empleamos como FGE el sismo del 15 de junio de 1999 como cuando usamos el evento del 21 de julio de 2000; sin embargo se ve que en los demás casos la probabilidad de superar un nivel de daño es mayor para el sitio SCT, dentro de las 15 distorsiones máximas consideradas para cada caso.

Las curvas de tasas de demanda estructural cuyas ordenadas son menores, para un sitio, fuente sísmica y un período estructural, indican que la confiabilidad es mayor en la estructura pues para un mismo nivel de daño el número de veces por año que este se excede es menor.

Chan y otros (2003) analizan diferentes criterios de escalamiento de registros sísmicos (subducción) en la estación SCT asociados a diferentes estructuras; por medio de la mediana y la desviación estándar de la distorsión máxima determinan la confiabilidad del sistema estructural y un número de registros sísmicos necesarios para tener cierto nivel de confianza, esto para definir el método de escalamiento mas adecuado. Comparando las tasas de demanda estructural obtenidas en este trabajo (ver figura 5.32), para el sitio SCT asociadas a la zona de Ometepec y a su CPS para  $T = 1$  segundo, con las obtenidas por Chan y otros (2003) para un edificio de 10 niveles bajo un criterio de escalamiento que considera  $\mu = 1$ ,  $\xi = 5\%$  y  $T = 1$  segundo, podemos decir:

1. En este trabajo, el orden de magnitud de las tasas de demanda estructural es inferior para los diferentes niveles de daño, esto esta relacionado con que las ordenadas de la CPS en el sitio para  $T = 1$  segundo son inferiores: las intensidades para las cuales se obtuvieron las diferentes simulaciones, corresponden a aquellas de las tasas de excedencia para una fuente en particular  $v_i(S_a)$  que afecta el sitio donde se encuentra nuestra estructura, en este caso SCT, y no a la contribución total o tasa total de las diversas fuentes significativas como se muestra en la expresión (5.16).

$$v(S_a) = \sum_{i=1}^N v_i(S_a) \quad (5.16)$$

2. Debido a que las ordenadas de las tasas de excedencia de intensidades para un sitio, en nuestro caso pseudo-aceleraciones espectrales, son inferiores pues consideran solo una de las fuentes significativas, las tasas de demanda estructural en un sitio, según la expresión (5.2), presentan para un mismo nivel de daño (d) ordenadas menores. El interés de emplear la tasa de excedencia de intensidades particular de una fuente sísmica apuntaba a determinar cual de ellas presentaba para la estructura mayor probabilidad de exceder un nivel de daño en un sitio.
3. Es de esperar que las tasas anuales de excedencia sean iguales, sin importar el criterio de escalamiento, si se analiza una misma estructura y esta se somete al mismo conjunto de sismos.

---

## CONCLUSIONES

### Capítulo I

Es posible que los registros de aceleraciones en ciertas ocasiones no representen en buena forma el movimiento del suelo ante un sismo, esto es debido a que existen diversos factores externos que pueden alterar su información.

Se hizo un proceso de inspección, estudio y clasificación de la información existente considerando la calidad en la información registrada por la red acelerométrica del valle de México consignada en la Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes (1999), esto con el fin de seleccionar cuáles sismos fueron bien registrados y por cuáles estaciones, para descartar los diferentes problemas de digitalización mencionados durante la obtención de resultados. Se agruparon los diferentes eventos dependiendo de la zona sismogénica de donde provenían, a todo lo largo del Pacífico mexicano y hacia el interior del país, y se graficaron espacialmente para tener una idea más clara de la actividad sísmica que afecta a ciudad de México.

### Capítulo II

Existen diferentes modelos matemáticos para representar de forma detallada las características del movimiento del suelo ante posibles eventos futuros empleando parámetros como: la magnitud, la caída de esfuerzos, la distancia al epicentro, la aceleración máxima del terreno y la duración; estos se han utilizado de forma conjunta para comprender el potencial del evento y sus efectos en diferentes sitios de ciudad de México.

Estas técnicas de simulación involucran el conocimiento de conceptos de ingeniería sísmica que no son comunes en la práctica profesional y que difícilmente serán asimilados por los ingenieros. Por ello, los ingenieros no emplean estas técnicas de simulación y recurren para el análisis estructural a acelerogramas registrados que en la mayoría de los casos poco tienen que ver con las condiciones del sitio donde se pretende construir una estructura.

Modelos como el de funciones empíricas de Green (FGE), empleado en este trabajo (Ordaz y otros, 1995), permite generar registros de sismos postulados de cierta magnitud en un sitio de interés definiendo ciertos parámetros de la fuente sísmica (momento sísmico y caída de esfuerzos) tanto para el evento esperado como para el evento pequeño y con ello es posible evaluar la respuesta de una estructura antes de que el evento sísmico ocurra, lo que permite manejar niveles de prevención y confiabilidad más altos. Además, la obtención e interpretación de registros de eventos futuros permitirá mejorar la manera actual de obtener espectros de diseño, buscando que estos estén asociados a aquellos sismos que sean generados por todas las fuentes potenciales en un sitio determinado, obteniendo espectros de respuesta de tamaños y formas diferentes.

### Capítulo III

Se presenta la información que diferentes investigadores (Singh y otros, 1986, 1989 y 1990; Ordaz y otros, 1995; Valdéz, 1995; Pacheco y otros, 1995) han publicado acerca de las caídas de esfuerzos y los momentos sísmicos para eventos ocurridos tanto de subducción como de falla normal.

Acerca de los parámetros empleados para obtener las diferentes simulaciones asociadas a una intensidad empleando el método de FGE se puede decir: el momento sísmico  $M_0$  se obtiene por la

expresión de H. Kanamori, tanto para eventos que provienen del Pacífico como del interior del país, conociendo cual será la magnitud probable del evento esperado; los momentos sísmicos y las caídas de esfuerzos son esencialmente independientes, aunque la caída de esfuerzos tiende a decrecer a medida que el momento sísmico se incrementa y finalmente, será conservador que el valor de la caída de esfuerzos para el evento postulado sea igual o menor que el del evento empleado como función de Green, considerando que la evidencia muestra esta tendencia.

## Capítulo IV

En este trabajo se observó que para estructuras con periodo menor de 0.8 segundos los acelerogramas escalados asociados a periodos de retorno de  $T_R = 50, 125, 200, 250$  y 475 años deben ser tomados de zonas de profundidad intermedia como son la centro y oeste que es donde se presentan las mayores intensidades; para estructuras con periodo estructural de  $0.8 < T < 4.0$  segundos los acelerogramas escalados asociados a los diferentes  $T_R$  deberán ser tomados de las zonas de subducción, y para estructuras con periodos estructurales mayores de  $T > 4.0$  segundos la zona sísmológica que se toma es indistinta.

Si se tiene una estructura cualquiera de periodo  $T$  es posible encontrar diferentes acelerogramas, pueden ser para diferentes momentos sísmicos y caídas de esfuerzos, los cuales presenten en su espectro de respuesta una intensidad similar a aquella que se espera genere un sismo que ocurrirá con cierto periodo de retorno. Como se dijo antes, la zona sísmica elegida depende de la forma que tengan para el sitio los espectros de peligro uniforme correspondientes; se elegirá aquella zona para la cual se esperan mayores intensidades y se tomará un evento originado allí del cual se conozcan los parámetros de fuente. Sin embargo, para determinar cual o cuales fuentes contribuyen más en el peligro sísmico, existen diferentes métodos como es el de McGuire (1995) en el que propone un método para estimar la combinación más probable de magnitud y distancia condicionada a un nivel de intensidad específico estimando la sismicidad en el sitio. Posteriormente Alamilla *et al.* (2003) propone un método más general evaluando la distribución de probabilidad conjunta condicionada a cualquier medida de intensidad.

Se encontró que en ciertos casos las simulaciones obtenidas no solo representan en buena forma la intensidad asociada a un periodo estructural determinado, sino que además cubren un amplio rango de periodos por lo cual se podría pensar que una(s) simulación(es) que cumpla con estas características puede representar una zona determinada; sin embargo lo práctico sería buscar simulaciones que estuvieran asociadas a la intensidad correspondiente del EPU para el periodo de la estructura que se piensa diseñar o revisar, según sea el objetivo de diseño.

De manera general, para eventos provenientes de la zona de *Ometepec* en terreno firme, en este caso CU, si se necesita encontrar una simulación que esté asociada a una intensidad del EPU del sitio para un periodo de retorno dado, solo basta con obtener aquella cuya intensidad sea la aceleración del suelo ( $T = 0$  segundos); en el caso de que el sitio de interés no esté en terreno firme, sino en zona de lago o transición, el periodo estructural para el cual las simulaciones obtenidas presentarán mayor concordancia con las diferentes intensidades del EPU del sitio, respecto a *Ometepec*, será el periodo del suelo.

Para generar simulaciones en un sitio cualquiera, en nuestro caso en el valle de México, cuyas aceleraciones sean acordes a una intensidad deseada, asociada a un periodo de retorno y un periodo de la estructura, se debe tomar en cuenta las diferentes zonas sísmológicas que lo afectarían. Sin embargo, hay que considerar que en este trabajo solo se tomó un solo evento, a lo sumo 2, en cada zona sísmológica y es necesario contar con la contribución de más eventos que provengan de la misma zona sísmológica para llegar a conclusiones más concretas. También, es necesario realizar más simulaciones para otros niveles de intensidad y reafirmar o no las observaciones anteriormente expuestas.

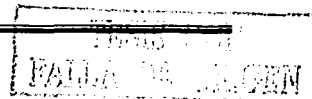
## Capítulo V

Con el procedimiento antes presentado se evalúa para qué periodo estructural ( $T$ ) y evento proveniente de alguna zona sísmológica es mayor la confiabilidad estructural. Con ello se puede tener mas certeza sobre el número de simulaciones requeridas de las diferentes fuentes sísmogénicas para evaluar el comportamiento de una estructura ubicada en algún sitio, considerando un nivel de confiabilidad y un periodo de retorno  $T_R$ . Además con este método presentado se puede determinar para qué zona sísmológica es mayor la probabilidad que un estado límite se vea sobrepasado en una estructura cualquiera.

Se presentan curvas medias de las varianzas logarítmica de las distorsiones Vs intensidades, para las tres zonas que afectan la estructura de 12 niveles en los diferentes sitios de la ciudad de México, y se observó cómo la curva correspondiente a la zona de *Ometepéc* presenta mayores ordenadas respecto a aquellas zonas de *Profundidad Intermedia Centro y Oeste*, cuyos eventos son de origen de falla normal. Las regresiones medias de las varianzas obtenidas para las zonas de *Profundidad Intermedia Centro y Oeste* son prácticamente idénticas por lo cual quedaría una expresión general para representar ambas zonas para la estructura de 12 niveles.

Futuras investigaciones, considerando estructuras de diferentes niveles en varios sitios del valle de México (terreno firme, transición y blando), para intensidades asociadas a otros periodos estructurales (incluyendo el del sitio) del EPU y para diferentes zonas sísmológicas permitirán obtener una expresión para el número de acelerogramas que además de depender de la varianza de la medida de daño seleccionada, dependa del número de niveles del edificio; además en estudios posteriores se podrá concluir con mayor certeza, si a partir de un valor del período dominante del suelo, los eventos provenientes de una zona o fuente sísmica dominan sobre las demás.

Por último, con las curvas de tasa de excedencia estructural, en cada sitio, se observó qué periodo estructural y de qué fuente provendrán las simulaciones que exigen mayor demanda a la estructura de 12 niveles, lo que nos permite tomar una decisión sobre de donde provendrán y que cantidad de eventos simulados se requieren. La idea es considerar diferentes zonas sísmológicas que puedan afectar la estructura a analizar, agruparlas según el tipo de falla (subducción, normal o intraplaca) y entonces de cada grupo elegir cual fuente demanda más para el sitio de interés y que número de simulaciones son necesarias.



## REFERENCIAS

**Abe, K.** "Static and dynamic fault parameters of the earthquake of July 1968", *Tectonophysics* 27: 223-238, 1975.

**Aguirre G., J.** "Procesos de la fuente de sismos mexicanos usando el método de funciones de Green empíricas y algoritmos genéticos". XIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Guadalajara, Jalisco, Noviembre 2001.

**Aki, K.** "Scaling law of seismic spectrum". *J. Geophys. Res.*, 72, 1217-1231, 1967.

**Alamilla, J., Esteva, L., García – Pérez, J. y Díaz – López, O.** "Simulating earthquake ground motion at a site, for given intensity and uncertain source location". *Journal of Seismology*, 5, 4, 475-485, 2001.

**Alamilla J., Esteva L., García – Pérez J. y Díaz – López O.** "Evolutionary properties of stochastic models of earthquake accelerograms: their dependence on magnitude and distance". *Journal of Seismology* 5: 1 – 21, 2001.

**Ang, A. Y Tang, W.** "Probability concepts in engineering planning and design". Volumen 1, 1976.

**Arias, A.** "A measure of earthquake intensity". *Seismic Design of Nuclear Power Plants*, Robert Hauseu, editor. Massachusetts Institute of Technology Press, Cambridge, MA 1969.

**Arnal, L. y Betancourt, M.** "Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal: ilustrado y comentado". Editorial Trillas, México, D.F., 1991.

**Arredondo, C., Jaimes, M., Reinoso A., E. y Ordaz, M.,** "Procedimiento para generar acelerogramas en la evaluación de la confiabilidad de estructuras afectadas por diferentes fuentes sísmológicas II: Aplicación", en proceso de publicación (2003).

**Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes (1999).** " <http://www.mexacceldb.unam.mx/db>".

**Benjamín, J. R. Y Cornell, C. A.** "Probability, statistics and decisions for civil engineers". Editorial McGraw Hill, Nueva York, E.U.A, 1970.

**Bertero, V.V.** "Performance – based seismic engineering: A critical review of proposed guidelines". Congreso Internacional en Bled Slovenia, A.A. Balkema.

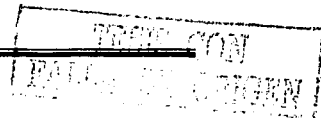
**Boore, D. M.** "Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra". *Bull. Seism. Soc. A.*, 73, 1865-1894, 1983.

**Boore, D.M. y Joyner, W. B.** "A note on the use of random vibration theory to predict peak amplitudes of transient signals". *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 74, No. 5, pp 2035-2039, 1984.

**Boore, D. M.** "Simulation of Ground Motion Using the Stochastic Method". *Pure and Applied Geophysics*, Birkhauser Verlag, Basel, 160, 635–676, 2003

**Brune, J. N.** "Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes". *J. Geophys. Res.*, 75: 4997-5009, 1970.

**Chan, S.** "Influencia del escalamiento de movimientos sísmicos de banda estrecha en la evaluación de la confiabilidad de edificios," Tesis de Maestría, DEPEI, UNAM, 2003.



**Chan, S., Ruiz, S. y Montiel, M.** "Escalamiento de acelerogramas y número mínimo de registros requeridos para el análisis de estructuras". SMIS, 2003.

**Chopra, A.K., Goel, R.K. y Chintanapakdee, C.** "Statistics of SDF estimate of displacement for pushover analysis of buildings". Journal of Structural Engineering, ASCE, Febrero, 2001.

**Cornell, C. A.** "Calculating building seismic performance reliability: A basis for multilevel design norms". 11<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Paper no. 2122, Acapulco, México.

**DEGTRA A.4 Versión 2.0.11, Ordaz, M. Y Montoya, C.** 1990-2001

**Esteve, L. y Ruiz S.** "Seismic Failure rates of multistory frames". ASCE, Journal of Structural Engineering, 115 (2), 268-284, 1989.

**Geller, R. J.** "scaling relations for earthquake source parameters and magnitudes". Bull. Seism. Soc. Am., 66, 1501-1523, 1976.

**Guerrero del A., R.** "Duración del movimiento durante sismos : Implicaciones en la degradación estructural", Tesis de Maestría, DEPMI, UNAM, México, D.F., 1997.

**Guerrero del A., R., Reinoso Angulo, E. y Ordaz S., M.** "Acelerogramas analíticos empleados para estimar el comportamiento estructural de edificios en la zona del Lago de la ciudad de México". Revista de Ingeniería Sísmica, No. 58, 23 – 29, 1998.

**Guerrero del A., R., Reinoso Angulo, E. y Ordaz S., M.** "Duración del movimiento y número de ciclos inelásticos de un sistema de un grado de libertad". XI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural. Noviembre de 1998. Monterrey, México. Vol. I.

**Hanks, T. C. y Kanamori, H.** "A moment magnitude scale". J. Geophys. Resch., 84, 1979.

**Hartzell, S. H.** "Earthquake aftershocks as Green's functions". Geophys. Res. Lett. 5, 1–4, 1978.

**Huerta G., B. y Reinoso A., E.** "Microzonificación y curvas de Igual energía en el valle de México". Tesis de Maestría, DEPMI, UNAM, 2001.

**Humphrey J. R., Jr y Anderson, J. G.** "Seismic source parameters from the Guerrero subduction zone". Bull. Seism. Soc. Am., 84, No 6, 1754 – 1769. December, 1994.

**Iida, M.** "Three dimensional non – linear soil – building interaction analysis in the lakebed zone of Mexico city during the hypothetical Guerrero earthquake". Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 27, 1483 – 1502, Abril, 1998.

**Irikura, K.** "semi-empirical estimation of strong ground motions during large earthquake using observed seismograms of small events". Proc 3<sup>rd</sup> International Microzonation Conference, Seattle, Vol1, 447-458, 1983.

**Irikura, K.** "Prediction of strong acceleration motions using empirical Green's function". Proc. 7<sup>th</sup> Japan Earthquake Engineering, 151 – 156, 1986.

**Irikura, K. Y K., Aki,** " A procedure for synthesizing strong ground motion from large earthquakes using small earthquake records". Submitted to Bull. Seism. Soc. Am., 1988.

**Iyama, J. y Kuwamura, H.** "Application of wavelets to analysis and simulation of earthquake motions". Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 28, 255 – 272, 1999 .

**Jaimes, M.** "Riesgo sísmico en el valle de México para varios periodos de retorno debido a sismos de subducción y de falla normal," Tesis de Maestría, DEPMI, UNAM, 2003.

**Jaimes, M., Arredondo, C., Reinoso A., E. y Ordaz, M.** (2003), "Procedimiento para generar acelerogramas en la evaluación de la confiabilidad de estructuras afectadas por diferentes fuentes sísmológicas I: Metodología" , en proceso de publicación.

**Joyner, W. B. y Boore, D.M.** " On simulating large earthquakes by Green's – functions addition of similar earthquakes". Earthquakes Source Mechanics, Geophysical Monograph 37 (Maurice Ewing), American Geophysical Union, 269-274.

**Kanamori, H y D. L.** "Theoretical basis of some empirical relations in seismology". Bull. Seism. Soc. Am., 65, 1073-1095, 1975.

**Marsal, R. J. y Mazaril, M.** "El Subsuelo de la Ciudad de México". Primer Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos y Cimentaciones, México, D.F., 1959.

**McGuire, R.** "Probabilistic seismic hazard analysis and design earthquakes: closing the loop". Bull. Seism. Soc. Am., 85, No. 5, 1275-1284, Octubre 1995.

**Miranda E.** "Site - depend strength-reduction factors," Journal of Structural Engineering., Vol. 119, No. 12, 3503-3519, 1993.

**NTCS-2002.** "Propuesta de Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo", <http://www.smie.or.mx/articulos>, abril 2002.

**Ordaz S., M., Arboleda, J. y Singh, S. K.** "A scheme of random summation of empirical Green's function to estimate ground motions from future large earthquakes". Bull. Seism. Soc. Am, Vol. 85, No. 6, pp. 1635 – 1647, Diciembre 1995.

**Ordaz, M. y Perez-Rocha L.E.** "Estimation of strength-reduction factors for elastoplastic system: a new approach," Earthquake Engineering. Struct. Dyn., 27, 889-901, 1998.

**Ordaz, M. Y Reyes, C.** "Earthquake hazard in Mexico city: observations versus computations". Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 89, No. 5, pp. 1379-1383, 1999.

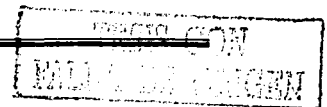
**Pacheco, Javier F. y Singh, S. K.** "Estimation of ground motions in the valley of Mexico from normal – faulting, intermediate – depth earthquakes in the subducted Cocos Plate". Earthquake Spectra, Vol. 11, No. 2, May 1995.

**Pardo, M. Y Suárez, G.** "Sismotectónica del sur de México: Subducción de las placas de Rivera y Cocos bajo la placa Norteamericana". La Sismología en México: 10 Años Después del Temblor de Michoacán del 19 de Septiembre de 1985 ( $M = 8.1$ ), Monografía No. 2, Unión Geofísica Mexicana, 165 – 180, 1995.

**Perea, T., Alamilla, J. y Esteva, L.** "Funciones de atenuación generalizadas para la simulación de acelerogramas de la componente vertical en roca". XIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Guadalajara, Jalisco (México), 2001.

**Reinoso Angulo, E.** "Algunos resultados recientes sobre el peligro sísmico en la ciudad de México". Revista de Ingeniería Sísmica, No. 53, 1 - 24, 1996.

**Reinoso, E. y Ordaz, M.** "Duration of strong ground motion during Mexican earthquakes in terms of magnitude, distance to the rupture area and dominant site period". Earthquake Engineering and Structural Dynamics, No. 30, pp. 653-673, 2001.



**Reyes, C.** "El estado límite de servicio en el diseño sísmico de edificios". Tesis Doctoral, DEPFI, UNAM, 1999.

**Rosenblueth, E. y Ordaz, M.** "Maximum earthquake magnitude at a fault" ASCE Engineering Mechanics Division Specialty Conference, Buffalo, NY, 1987.

**Rosenblueth, E., M., Ordaz S., M., Sánchez-Sesma, F. J. y Singh, S. K.** "The Mexico earthquake of september 19, 1985 design spectra for Mexico's Federal District". Earthquake Spectra, Vol. 5, No. 1, 1989.

**Shome, N., Cornell, C.A., Bazzurro, P. y Carballo, E.** "Earthquakes, records and nonlinear responses". Earthquake Spectra, Volumen 14, No. 3, Agosto 1998.

**Shome, N. y Cornell, C.A.** "Probabilistic seismic demand analysis of nonlinear structures". Reliability of Marine Structures Program, Reporte no. RMS-35, Dep. of Civil Eng., Stanford University, Stanford, CA., 1999.

**Singh, S. K. y Suárez, G.** "Review of the seismicity of Mexico with emphasis on the September 1985, Michoacan Earthquakes", Instituto de geofísica, UNAM, 1986.

**Singh, S. K., Ordaz S., M., Anderson, J. G., Rodríguez, M., Quaas, R., Mena, E., Ottaviani, M. y Almora, D.** "Analysis of near - source strong - motion recordings along the Mexican subduction zone". Bulletin of The Seismological Society of America, Vol. 79, No. 6, pp. 1697-1717. Diciembre 1989.

**Singh, S. K. y Mortera, F.** "Source - time functions of large Mexican subduction zone earthquakes, morphology of the Benioff zone, and the extent of the Guerrero gap". J. Geophys. Res 96: 21487 - 21502, 1990.

**Singh, S. K., Ordaz S., M y Pérez-Rocha, L. E.** "The great Mexican earthquake of 19 June 1858: Expected ground motions and damage in Mexico city from a similar future event". Bull. Seism. Soc. Am, Vol. 86, No. 6, pp. 1655-1666. December 1996.

**Singh, S. K., Ordaz S., M., Pacheco, J. F., Quaas, R., Alcántara, L., Alcocer, S., Gutiérrez, C., Meli, R y Ovando, E.** "A preliminary report on the Tehuacán, México earthquake of June 15, 1999 ( $M_w = 7.0$ )". Seismological Research Letter, Vol. 70, No 5, Septiembre / Octubre 1999.

**Singh, S. K., Ordaz S., M., Alcántara, L., Shapiro, N., Kostoglodov, V., Pacheco, J. F., Alcocer, S., Gutierrez, C., Quaas, R., Mikumo, T. y Ovando, E.** "The Oaxaca earthquake of september 30, 1999 ( $M_w = 7.5$ ): A normal - faulting event in the subducted Cocos Plate", Seism. Res. Lett. 71, 67 - 78, 2000.

**Spiegel, M.R.** "Teoría y Problemas de Estadística". Cali: Libros McGraw-Hill, 1978.

**Terán - Gilmore.** "Tendencias actuales de la normatividad sísmica". Universidad Autónoma Metropolitana, México, Azcapotzalco.

**Valdéz G., J. Y Ramírez del A., H.** "Generación de acelerogramas sintéticos para la ciudad de Toluca que resultarían de la ocurrencia de un temblor hipotético de magnitud 8.3 en la brecha de Guerrero". Revista de Ingeniería Sísmica, No 51, 13-24, 1995.

**Wennerberg, L.** "Stochastic summation of empirical Green's functions", Bull. Seism. Soc. Am. 80, 1418-1432.





Tabla A.2 Estaciones de la Red Acelerométrica del valle de México

ESTACIÓN	nombre	Longitud	Latitud	Ts
01/AL01	ALAMEDA	-99 1453	19 4356	2 1
02/AE02	AEROPUERTO	-99 0584	19 4290	5 1
03/CJ03	C U JUAREZ	-99 1567	19 4097	1 9
04/CJ04	CUPJ	-99 1566	19 4098	1 9
05/CI05	CIBELLES	-99 1653	19 4186	1 9
06/XP06	XOCHIMILCO	-99 1353	19 4198	2 8
07/TE07	TECAMACHALCO	-99 2217	19 4269	0 5
08/EX08	SEC #3 AZOTEA - CENTRO EDIF 1	-99 1602	19 4236	2 2
09/EX09	SEC #3 AZOTEA CENTRO EDIF 2	-99 1602	19 4236	2 5
10/PE10	AV PLUTARCO ELIAS	-99 1318	19 3899	2 3
11/AU11	AUTODROMO HNOS RODRIGUEZ	-99 0859	19 3919	4 5
12/DM12	DEPORTIVO MOCTEZUMA	-99 0963	19 4312	3 8
13/TP13	ESCUELA PRIMARIA "1" DE MAYO"	-99 1708	19 2922	0 5
14/AR14	ARAGON	-99 0760	19 4806	3 8
15/MI15	GLORIETA EN PERIFERICO SUR	-99 1253	19 2834	1 4
16/DR16	DEPORTIVO REINOSA	-99 1829	19 5005	0 6
17/LV17	LINDAVISTA	-99 1275	19 4931	1 2
18/CE18	CERRO DE LA ESTRELLA	-99 0847	19 3398	0 5
19/MY19	MEYEHUALCO	-99 0433	19 3461	2 7
20/NZ20	NEZAHUALCOYOTL	-99 0000	19 4027	4 9
21/UJ21	UNIVERSIDAD IBEROAMERICANA	-99 2261	19 3653	0 5
22/BE22	BERO	-99 1297	19 3450	1 5
23/CE23	CETIS	-99 0642	19 4619	4 9
24/AO24	ALBERCA OLIMPICA	-99 1539	19 3580	1 1
25/PC25	P C C SUPERFICIE	-99 1444	19 4283	2 3
27/GR27	GRANJAS	-99 1797	19 4747	0 8
28/CP28	CERRO DEL PEÑON	-99 0839	19 4385	0 5
29/M/29	VILLA DEL MAR	-99 1253	19 3811	2 7
30/EO30	ESPARZA OTEO	-99 1772	19 3885	0 5
31/NZ31	NEZAHUALCOYOTL	-99 0247	19 4167	5 2
32/CE32	CETIS 57	-99 0537	19 3858	4 4
33/LI33	LICONSA	-98 9631	19 3064	2 6
34/PA34	SAN PEDRO ATOCPAN	-99 0491	19 2016	0 5
35/TH35	TLAHUAC	-99 0000	19 2786	5
36/XO36	XOCHIMILCO	-99 1024	19 2711	3 5
37/DX37	XOTEPINGO	-99 1439	19 3322	1 1
38/GC38	GARCIA CAMPILLO	-99 1059	19 3161	1 8
39/BO39	BONDQUITO	-99 1047	19 4653	2 7
40/M/40	SEP - IMP	-99 2032	19 3428	0 5
41/HA41	HANGARES	-99 0786	19 4183	4 7
42/PD42	PALACIO DE LOS DEPORTES	-99 0997	19 4055	4 4
43/JA43	JAMACA	-99 1250	19 4053	3 1
44/VC44	UNIDAD COLONIA IMSS	-99 1654	19 4337	1 3
45/BL45	BALDERAS	-99 1481	19 4253	2 5
46/AU46	ANGEL URRAZA	-99 1681	19 3832	0 9
47/CO47	ESCUELA PRIMARIA C ESCOLAR	-99 1703	19 3714	0 5
48/RM48	RODOLFO MENÉNDEZ	-99 1280	19 4359	2 4
49/BA49	BUENOS AIRES	-99 1450	19 4097	2 8
50/MT50	MARISCAL TITO	-99 1900	19 4253	0 6
51/SP51	SECTOR POPULAR	-99 1189	19 3656	2 2
52/ME	MARIANO ESCOBEDO	-99 1820	19 4383	0 9
53/SI53	SAN SIMON	-99 1483	19 3753	1 5

ESTACIÓN	nombre	Longitud	Latitud	Ts
54/JC54	JARDINES DE COYOACAN	-99 1272	19 3130	1 1
55/TL55	TLATELOLCO	-99 1425	19 4536	1 9
56/CO56	CORDOBA	-99 1590	19 4215	2 4
57/ES57	ESCANDON	-99 1775	19 4017	0 9
58/LI58	LIVERPOOL	-99 1569	19 4263	2 3
59/CA59	CANDELARIA	-99 1183	19 4258	3 1
62/GA62	GARIBALDI	-99 1401	19 4385	2 1
64/CT64	CERRO DEL TEPEYAC	-95 1137	19 4876	0 5
68/AP68	APATLACO	-99 1068	19 3809	3 3
72/HJ72	HOSPITAL JUAREZ	-99 1301	19 4251	2 5
74/FJ74	FUNDACION JAVIER BARROS SIERRA	-99 2100	19 2990	0 5
78/CS78	COLINAS DEL SUR	-99 2262	19 3656	0 5
80/CU80	CUEMANCO	-99 1037	19 2938	2 8
84/CH84	CULHUACAN	-99 1254	19 3300	1 4
CD/CDAO	CENTRAL DE ABASTOS OFICINAS	-99 0960	19 3720	3 2
CM/DFCM	COLEGIO MADRID	-99 1340	19 2870	1 2
MIMI15	MIRAMONTES	-99 1253	19 2834	0 5
MR		-99 1500	19 4200	0 5
PE/PE10	PLUTARCO ELIAS CALLES	-99 1318	19 3899	2
RO/DFRO	ROMA	-99 1660	19 4050	1 3
SC/SCT1	SCT B-1	-99 1470	19 3930	1 9
SC/SCT2	SCT B-2	-99 1470	19 3930	1 9
TB/TLHB	TLAHUAC BOMBAS	-99 0060	19 2790	5
TX/TXCR	TEXCOCO SAN MIGUEL TLAXPAN	-98 8050	19 5180	0 5
TX/TXS1	TEXCOCO SITIO 1	-98 9730	19 4930	0 5
TX/TXS2	TEXCOCO SITIO 2	-98 9770	19 4920	0 5
TY/TACY	TACUBAYA	-99 1940	19 4030	0 5
VG/DFVG	PREPARATORIA #7 (LA VIGA)	-99 1260	19 4190	3
VV/SXVI	SISMEX VIVEROS	-99 1710	19 3580	0 5
CU/CU01	IDEI LAB INSTRUMENTACION SISMICA	-99 1830	19 3300	0 5
CU/CUP1	IDEI PATIO 1	-99 1830	19 3300	0 5
CU/CUP2	IDEI PATIO 2	-99 1830	19 3300	0 5
CU/CUP3	IDEI PATIO 3	-99 1830	19 3300	0 5
CU/CUP4	IDEI PATIO 4	-99 1830	19 3300	0 5
CU/CUP5	IDEI PATIO 5	-99 1830	19 3300	0 5
CH/CHAS	CHAPULTEPEC SUPERFICIE	-99 2048	19 4157	0 5
CY/COY1	COYOACAN POZO 12 M	-99 1687	19 3477	0 7
CY/COY2	COYOACAN POZO 70 M	-99 1687	19 3477	0 7
ES/ESTS	ESTANZUELA SUPERFICIE	-99 1111	19 4916	0 5
ES/ES57	ESCANDON	-99 1775	19 4017	0 5
IM/IMPS	IMP SUPERFICIE	-99 1489	19 4885	0 8
RM		-99 1500	19 4200	2 4
TL/TL08	TLATELOLCO	-99 1336	19 4500	3 8
TL/TL55	TLATELOLCO	-99 1425	19 4536	3 8
UK/UNK1	UNIDAD KENNEDY POZO 30 M	-99 1111	19 4186	3 6
UK/UNK2	UNIDAD KENNEDY POZO 83 M	-99 1111	19 4186	3 6
UK/UNK3	UNIDAD KENNEDY BASE EDIFICIO	-99 1111	19 4186	3 6
UK/UNK4	UNIDAD KENNEDY AZOTEA EDIFICIO	-99 1111	19 4186	3 6
UK/UNK5	UNIDAD KENNEDY SUPERFICIE	-99 1111	19 4186	3 6
ZA/ZAR1	ZARAGOZA POZO 30 M	-99 0876	19 4192	4 3
ZA/ZAR2	ZARAGOZA POZO 83 M	-99 0876	19 4192	4 3
ZA/ZARS	ZARAGOZA SUPERFICIE	-99 0876	19 4192	4 3

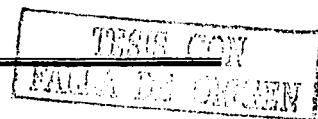






Tabla A.3 Registros de buena calidad provenientes de las diferentes zonas (continuación)

ESTACION	Z1	Z2	Z3		Z4	Z5	Z6		Z7	Z8	Z9		Z10		Z11	Z12	Z13	Z14
MR																		
PE/PE10	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
RO/DIFRO	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
SC/SC1	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
SC/SC2	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
TB/TLHB	J	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
TX/TXCR	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
TX/TXS1				A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
TX/TXS2				A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
TY/TACY	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
VG/DVVG			A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
VJ/SXV	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
CU/CU01																		
CU/CUP1	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
CU/CUP2		A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
CU/CUP3	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
CU/CUP4		A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
CU/CUP5		A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
CH/CHAS		A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
CY/COY1	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
CY/COY2	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
ES/ESTS	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
ES/ES57	B	B	B	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	B	B
IM/IMPS	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
RM	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
TL/TL08	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
TL/TL55	B	B	B	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	B	B
UKA/UK1	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
UKA/UK2	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
UKA/UK3		A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
UKA/UK4		A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
UKA/UKS	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
ZAZAR1	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
ZAZAR2	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
ZAZARS	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A











Tabla A.5 Características de digitalización y tiempo encontradas en los diferentes registros.

Tipo	Características de digitalización y tiempo
A	Registro digital completo. Tiempo absoluto correcto.
B	Registro digital completo. Carece de tiempo absoluto.
C	Registro digital sin la parte final. Tiempo absoluto correcto.
D	Registro digital sin la parte final. Carece de tiempo absoluto.
E	Registro digital sin una parte al inicio. Tiene tiempo absoluto.
F	Registro digital sin una parte al inicio. Carece de tiempo absoluto.
G	Registro analógico sin una parte al inicio. Tiene tiempo absoluto. La digitalización fue automática.
H	Registro analógico sin una parte al inicio. Carece de tiempo absoluto. La digitalización fue automática.
I	Registro analógico sin una parte al inicio. Tiene tiempo absoluto. La digitalización fue semiautomática o manual.
J	Registro analógico sin una parte al inicio. Carece de tiempo absoluto. La digitalización fue semiautomática o manual.
K	Registro analógico con amplitudes muy bajas (no digitalizable). Las amplitudes en este caso son aproximadas y medidas directamente del registro de origen.
L	Registro analógico sin proceso de digitalización.
X	Registro incompleto en su parte intensa o con muchos errores o película atorada o dudoso por alguna falla del aparato. En general un acelerograma no confiable que solo permite tener una idea aproximada de los valores de aceleración máximos.

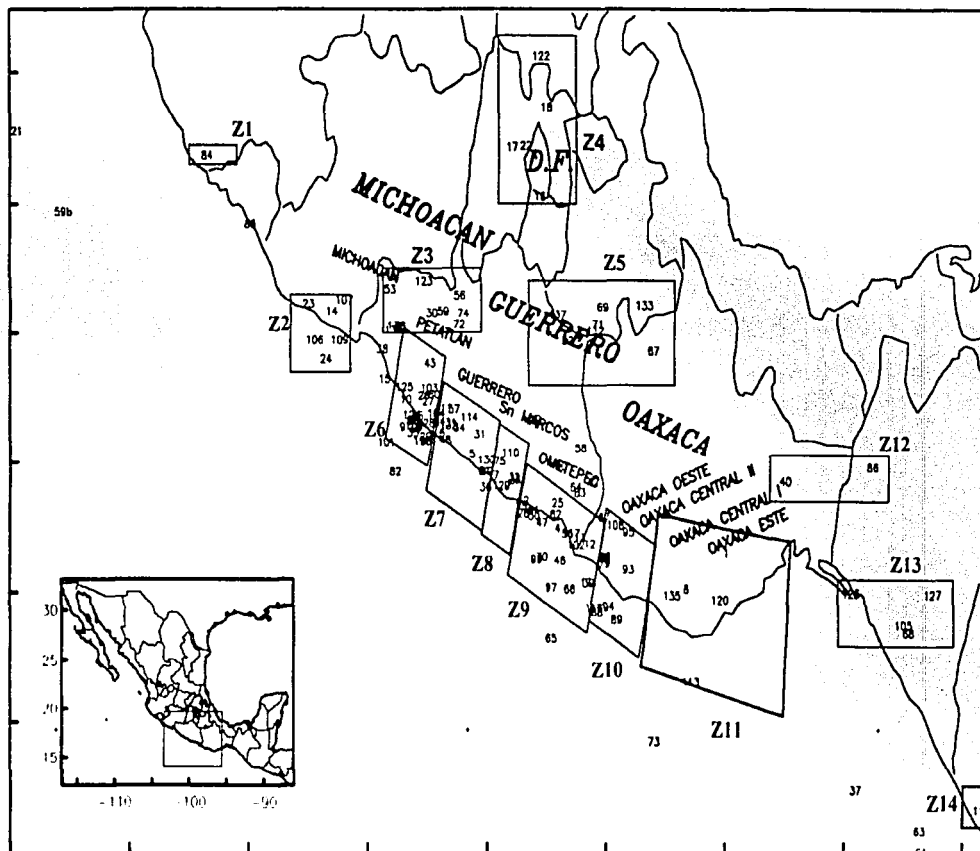


Figura A.1 Zonificación, Sismos de Subducción, Falla Normal e Intraplaca ocurridos desde 1965

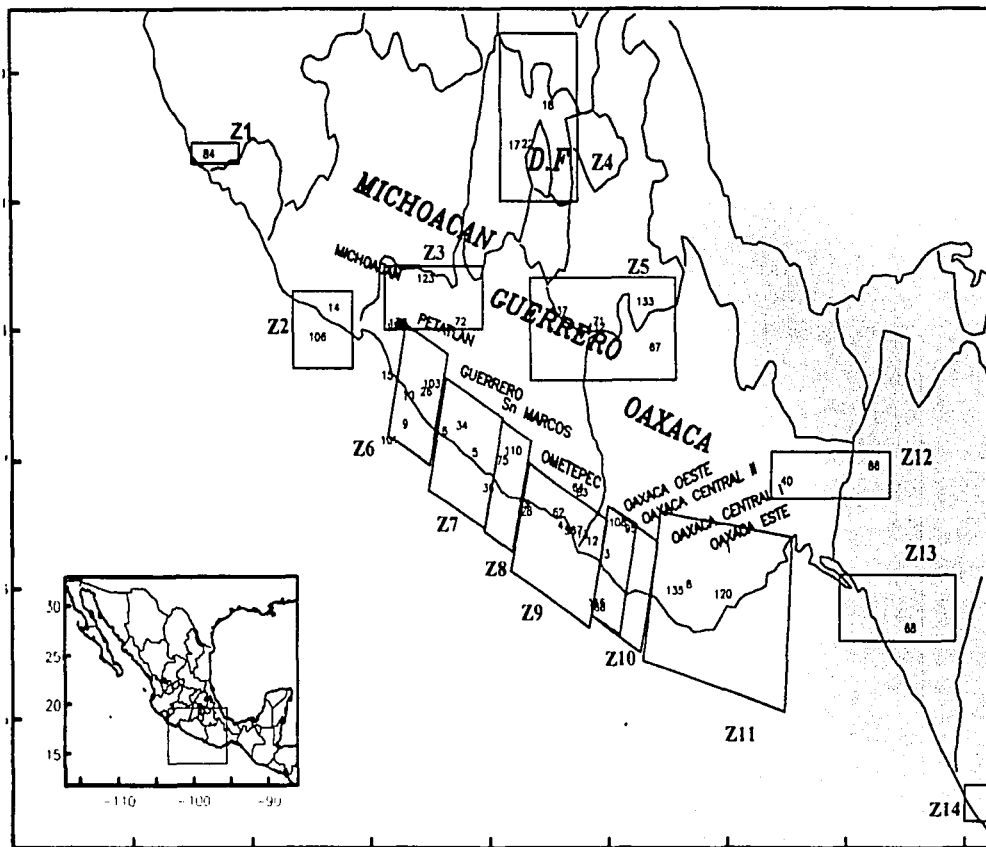


Figura A.2 Zonificación y Sismos Elegidos Para Cada Zona

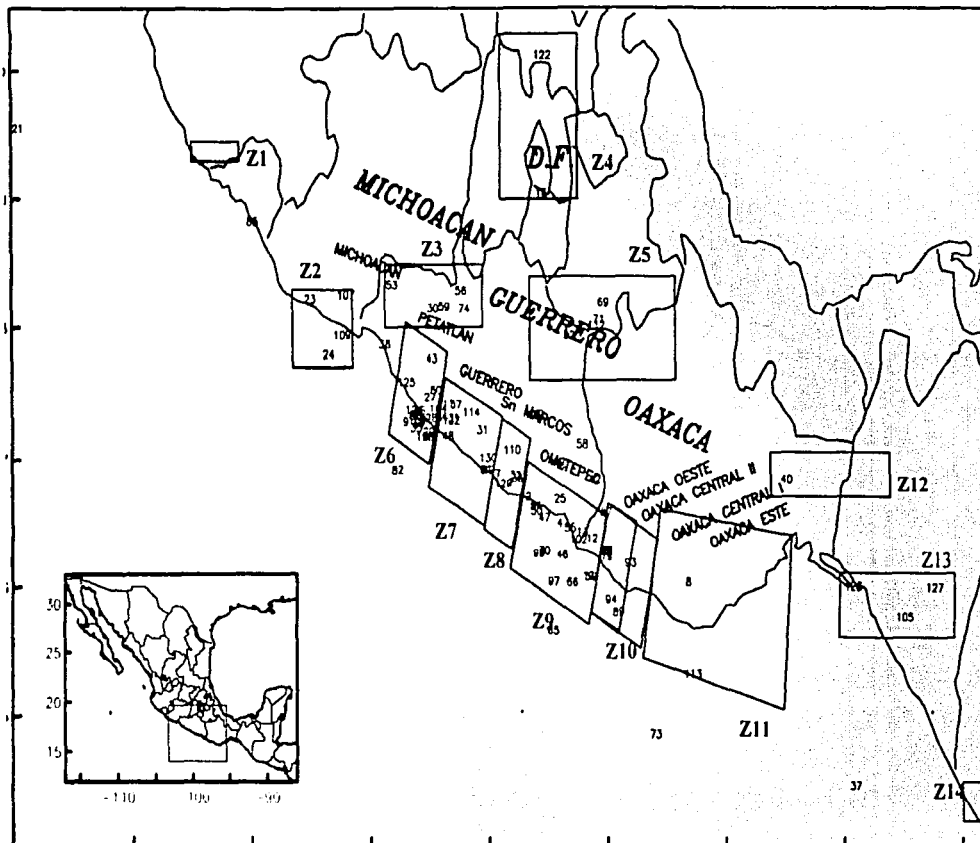


Figura A.3 Zonificación y Sismos Descartados Para Cada Zona

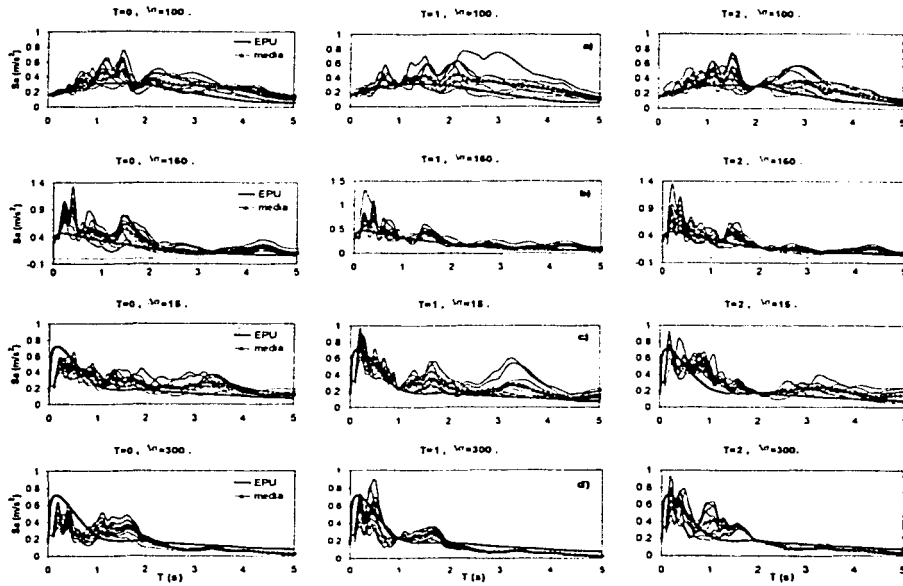
**ANEXO B: ESPECTROS DE RESPUESTA DE LAS DIFERENTES SIMULACIONES ASOCIADAS A UNA INTENSIDAD DEL EPU**


Figura B.1 Espectros de aceleración para diferentes simulaciones en CU empleando como FGE: a) 25/04/89, b) 23/05/94, c) 15/06/99 y d) 21/07/00; asociados a un  $T_R = 50$  años

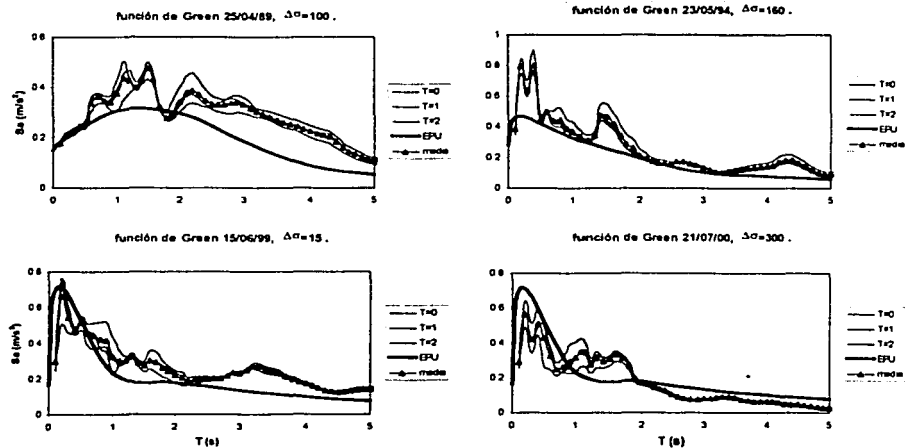


Figura B.2 Espectros de respuesta promedio en CU para un  $T_R = 50$  años

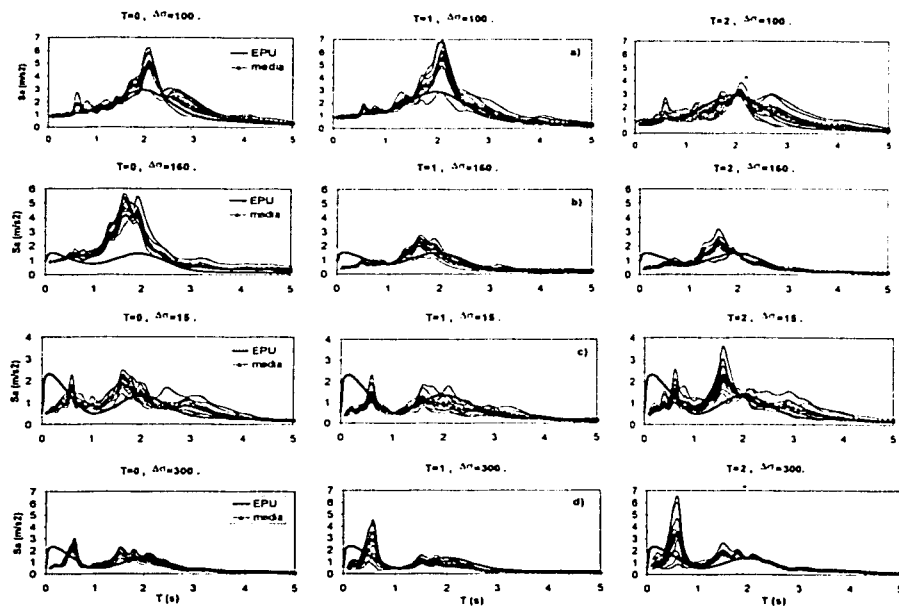


Figura B.3 Espectros de aceleración para diferentes simulaciones en SCT empleando como FGE: a) 25/04/89, b) 23/05/94, c) 15/06/99 y d) 21/07/00; asociados a un  $T_R = 50$  años

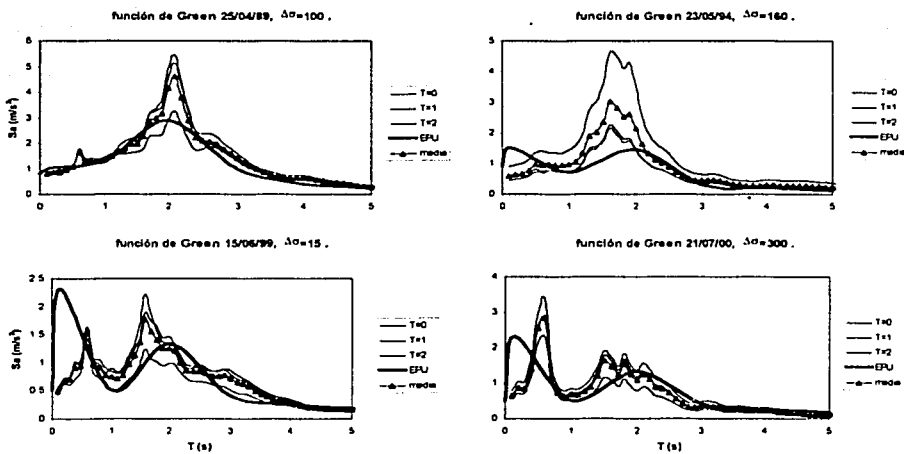


Figura B.4 Espectros de respuesta promedio en SCT para un  $T_R = 50$  años

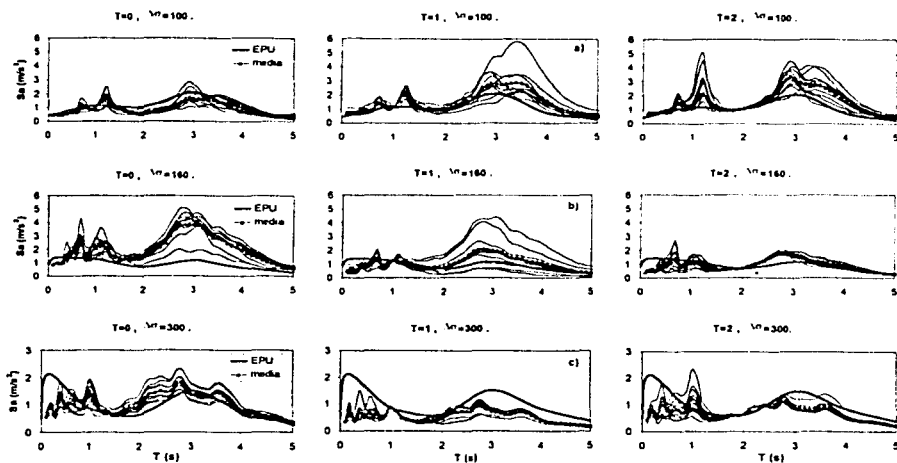


Figura B.5 Espectros de aceleración para diferentes simulaciones en CD empleando como FGE: a) 25/04/89, b) 23/05/94 y c) 21/07/00; asociados a un  $T_R = 50$  años

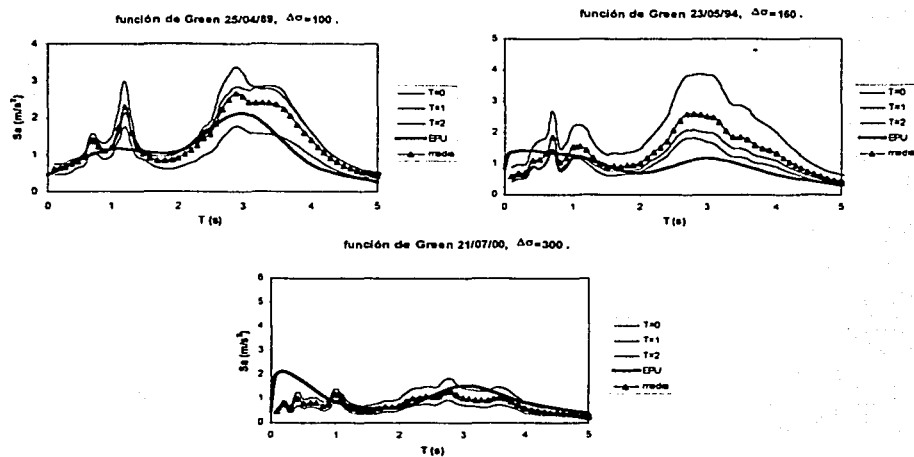


Figura B.6 Espectros de respuesta promedio en CD para un  $T_R = 50$  años



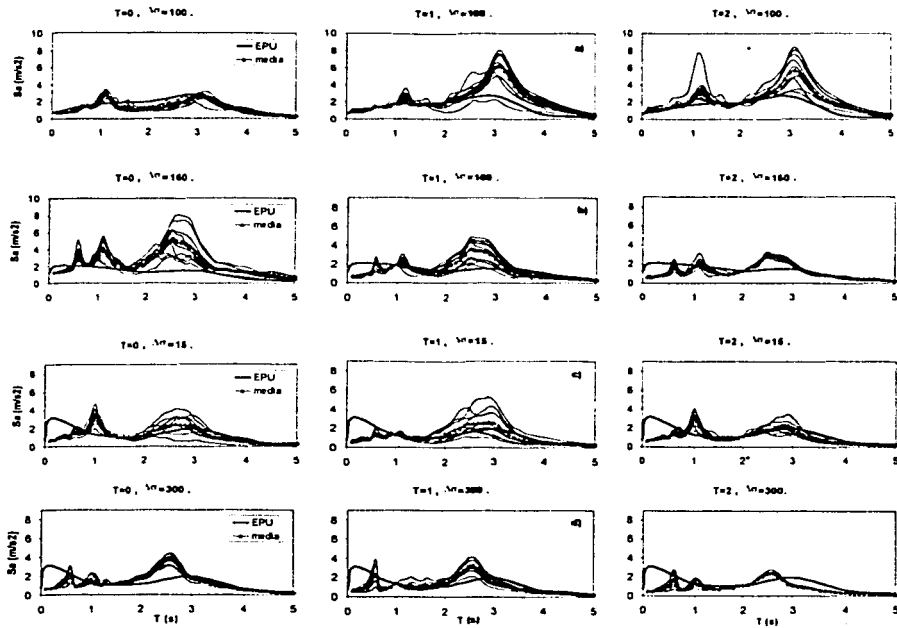


Figura B.7 Espectros de aceleración para diferentes simulaciones en 49 empleando como FGE: a) 25/04/89, b) 23/05/94, c) 15/06/99 y d) 21/07/00; asociados a un  $T_R = 50$  años

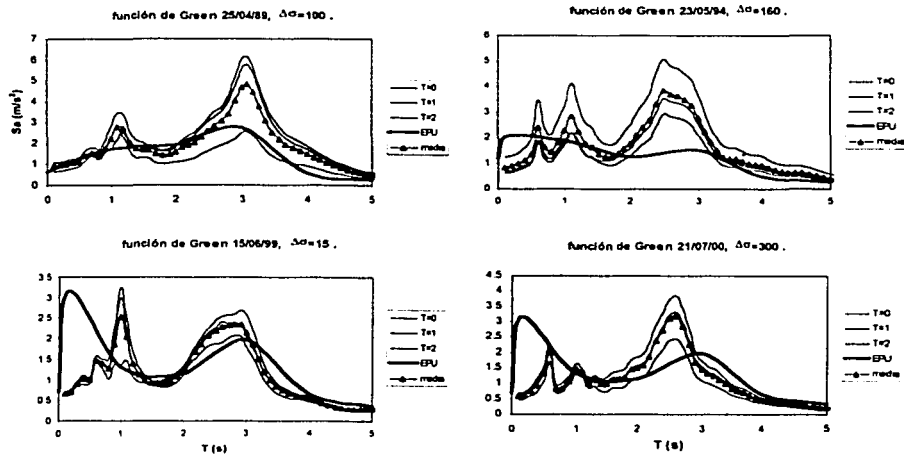


Figura B.8 Espectros de respuesta promedio en 49 para un  $T_R = 50$  años

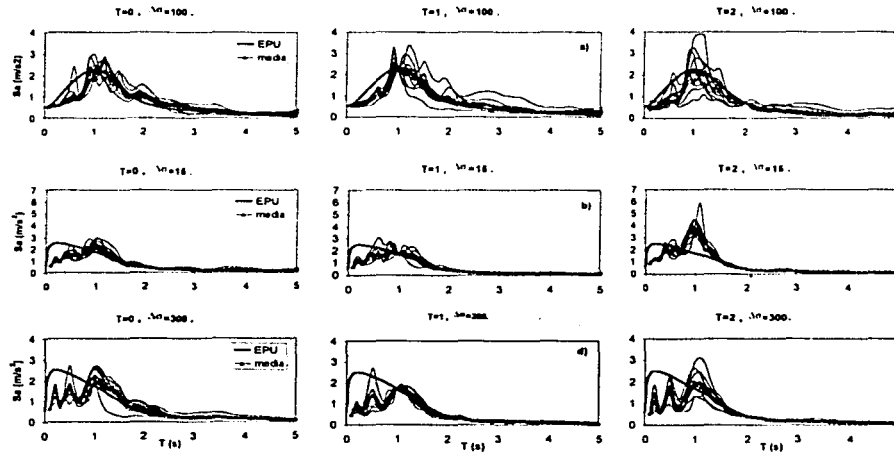


Figura B.9 Espectros de aceleración para diferentes simulaciones en 54 empleando como FGE: a) 25/04/89, b) 15/06/99 y c) 21/07/00; asociados a un  $T_R = 50$  años

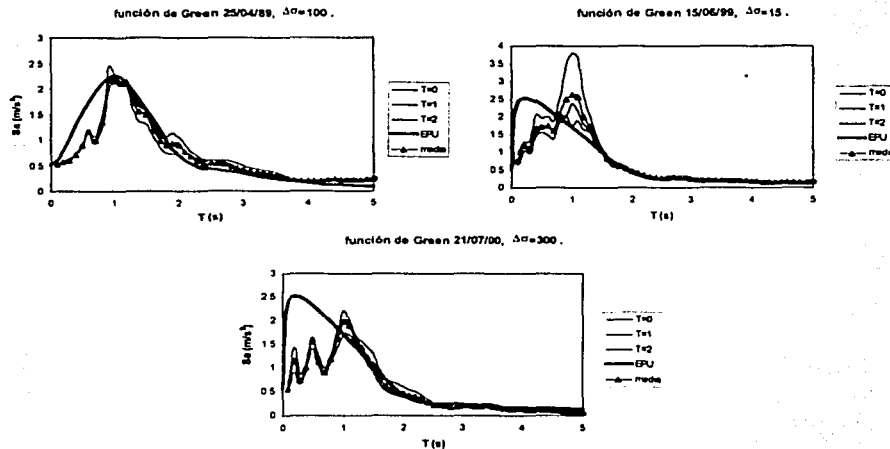


Figura B.10 Espectros de respuesta promedio en 54 para un  $T_R = 50$  años

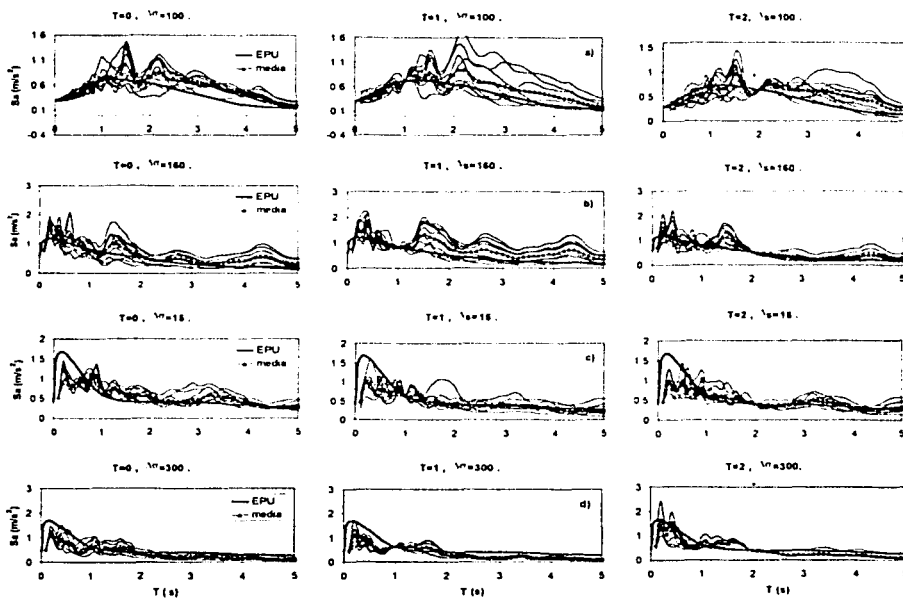


Figura B.11 Espectros de aceleración para diferentes simulaciones en CU empleando como FGE: a) 25/04/89, b) 23/05/94, c) 15/06/99 y d) 21/07/00; asociados a un  $T_R = 200$  años

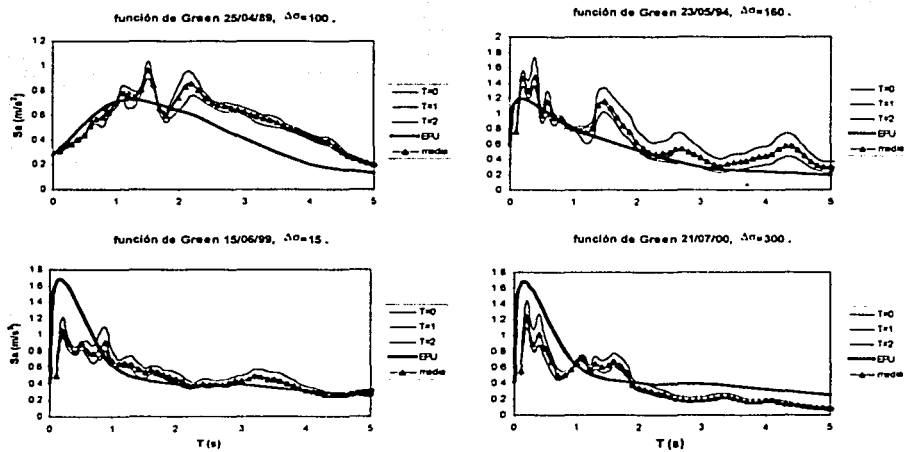


Figura B.12 Espectros de respuesta promedio en CU para un  $T_R = 200$  años

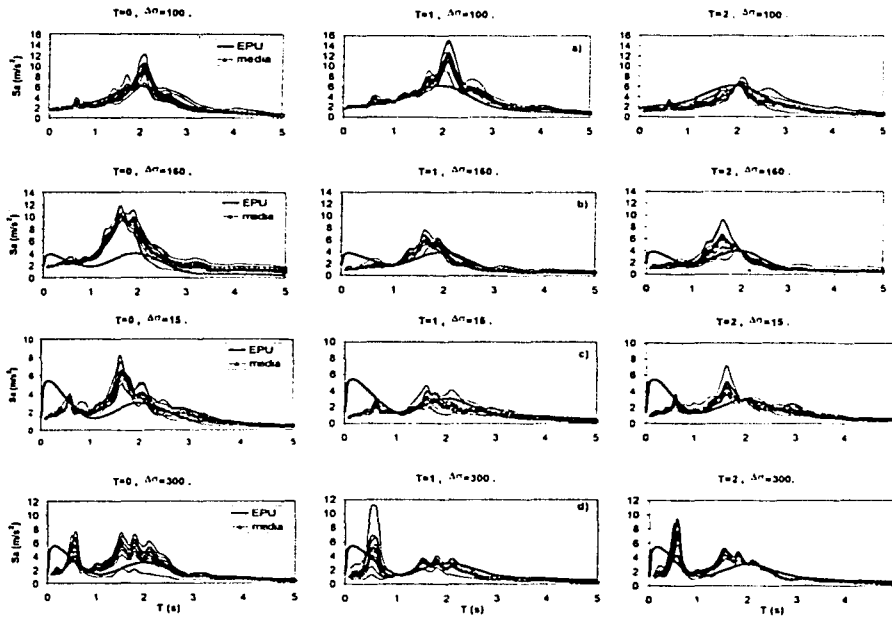


Figura B.13 Espectros de aceleración para diferentes simulaciones en SCT empleando como FGE: a) 25/04/89, b) 23/05/94, c) 15/06/99 y d) 21/07/00; asociados a un  $T_R = 200$  años

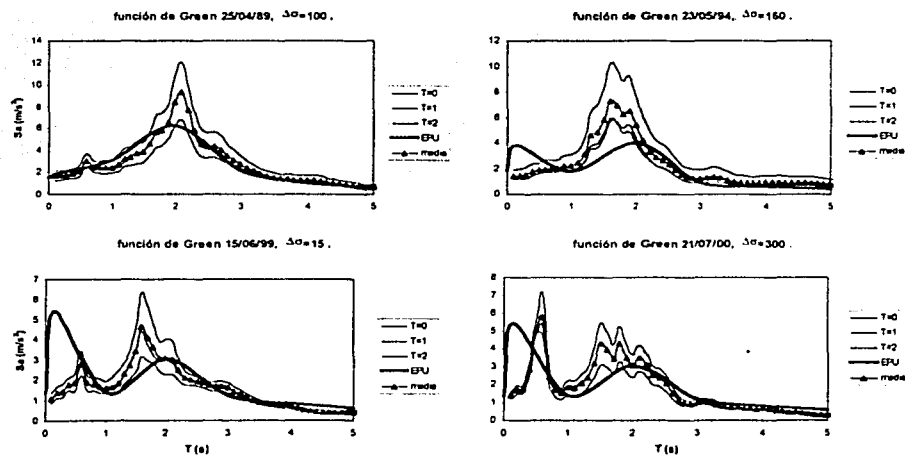
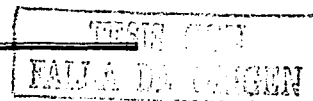


Figura B.14 Espectros de respuesta promedio en SCT para un  $T_R = 200$  años



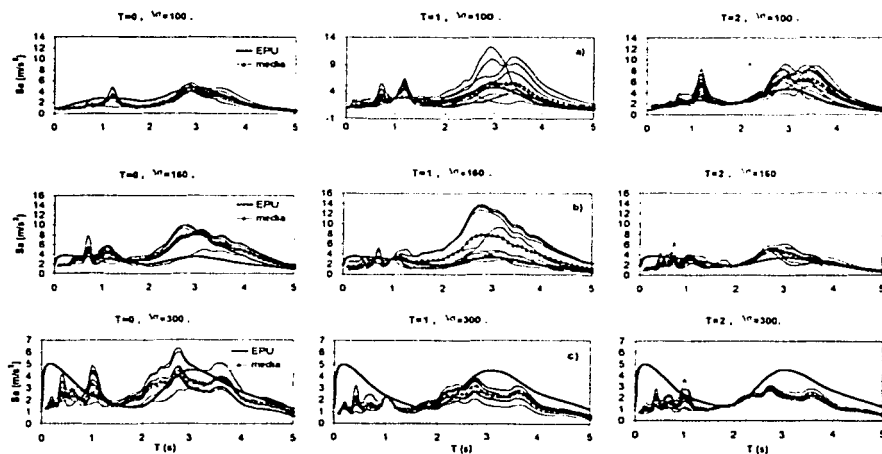


Figura B.15 Espectros de aceleración para diferentes simulaciones en CD empleando como FGE: a) 25/04/89, b) 23/05/94 y c) 21/07/00; asociados a un  $T_R = 200$  años

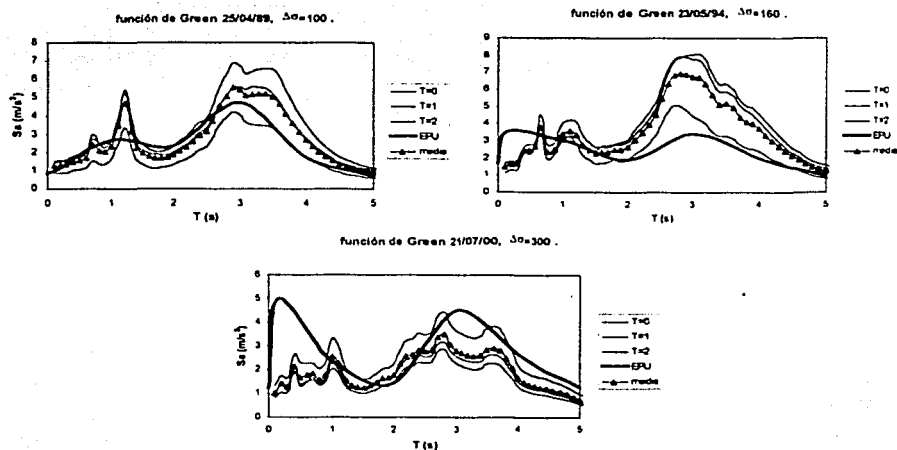


Figura B.16 Espectros de respuesta promedio en CD para un  $T_R = 200$  años

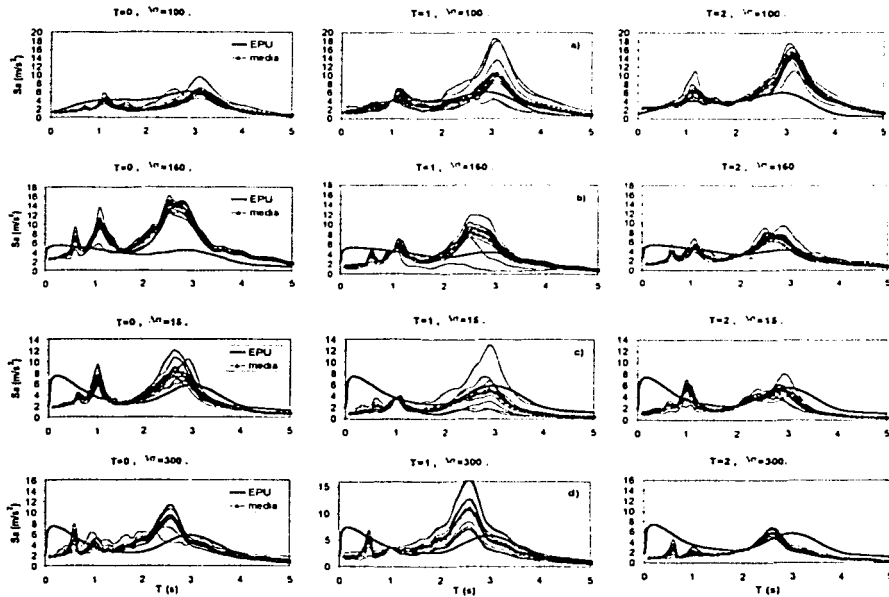


Figura B.17 Espectros de aceleración para diferentes simulaciones en 49 empleando como FGE: a) 25/04/89, b) 23/05/94 c) 15/06/99 y d) 21/07/00; asociados a un  $T_R = 200$  años

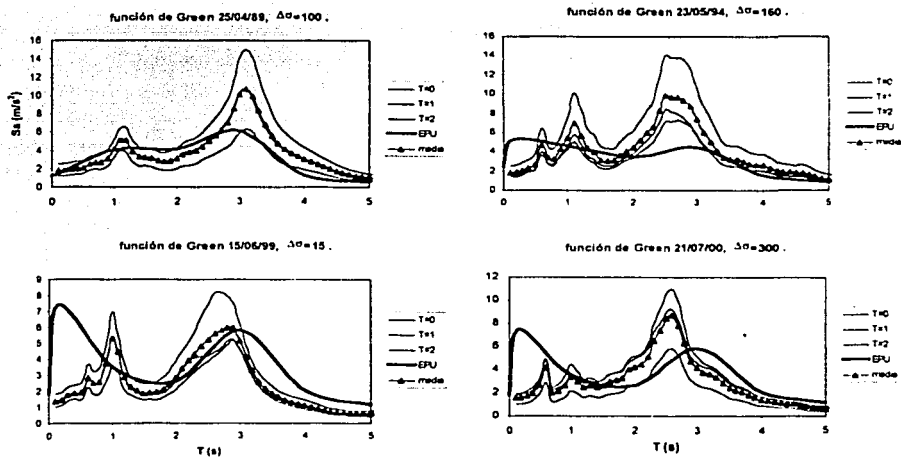
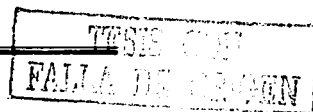


Figura B.18 Espectros de respuesta promedio en 49 para un  $T_R = 200$  años



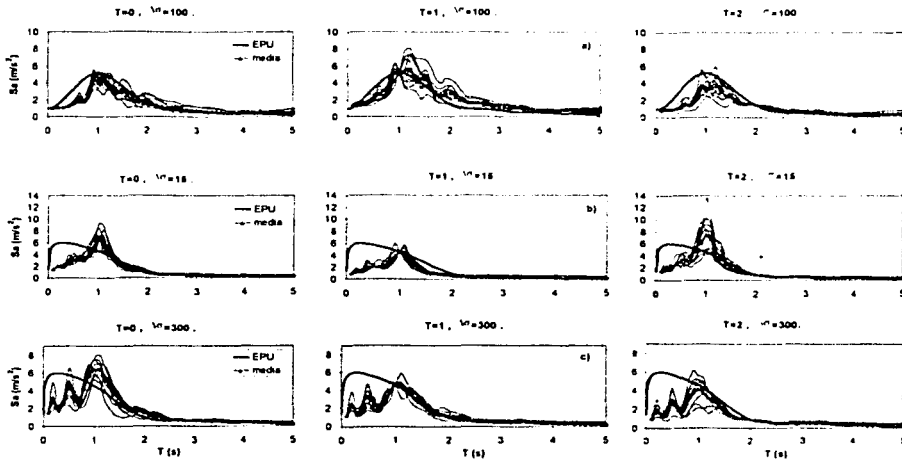


Figura B.19 Espectros de aceleración para diferentes simulaciones en 54 empleando como FGE: a) 25/04/89, b) 15/06/99 y c) 21/07/00; asociados a un  $T_R = 200$  años.

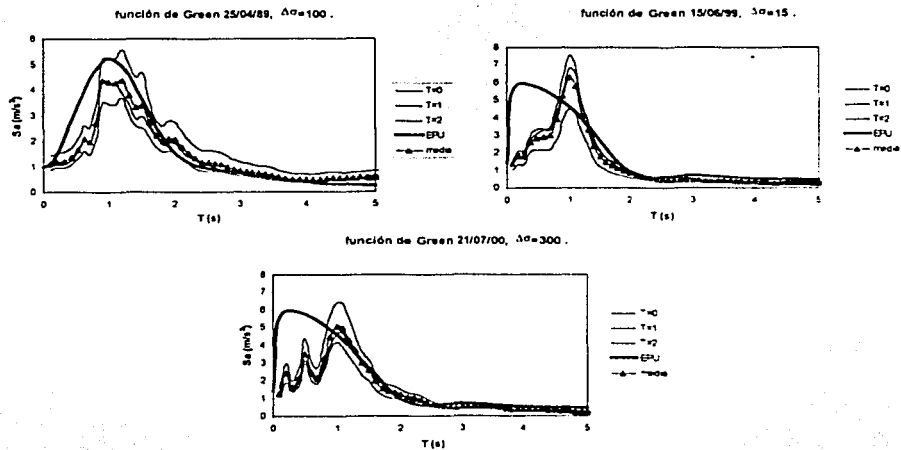


Figura B.20 Espectros de respuesta promedio en 54 para un  $T_R = 200$  años

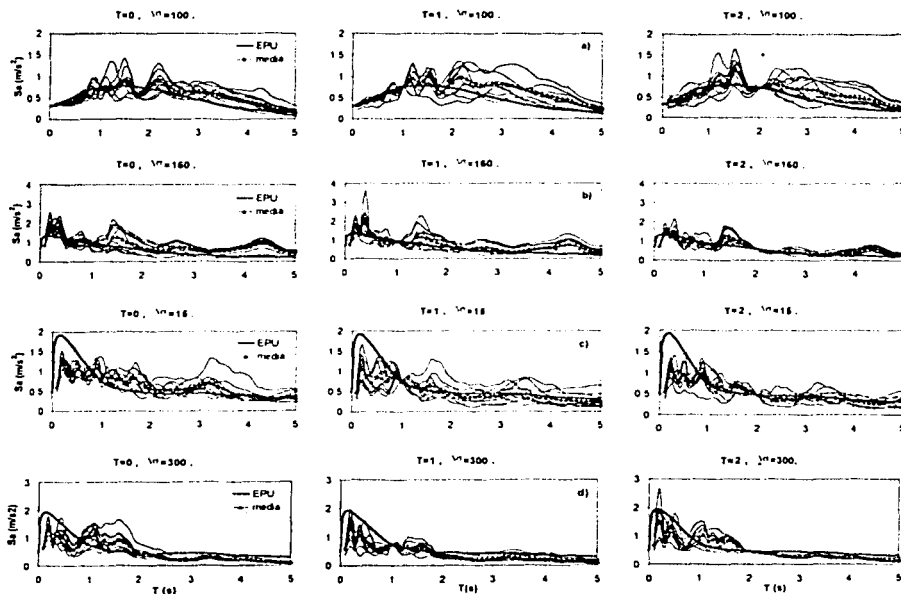


Figura B.21 Espectros de aceleración para diferentes simulaciones en CU empleando como FGE: a) 25/04/89, b) 23/05/94, c) 15/06/99 y d) 21/07/00; asociados a un  $T_R = 250$  años

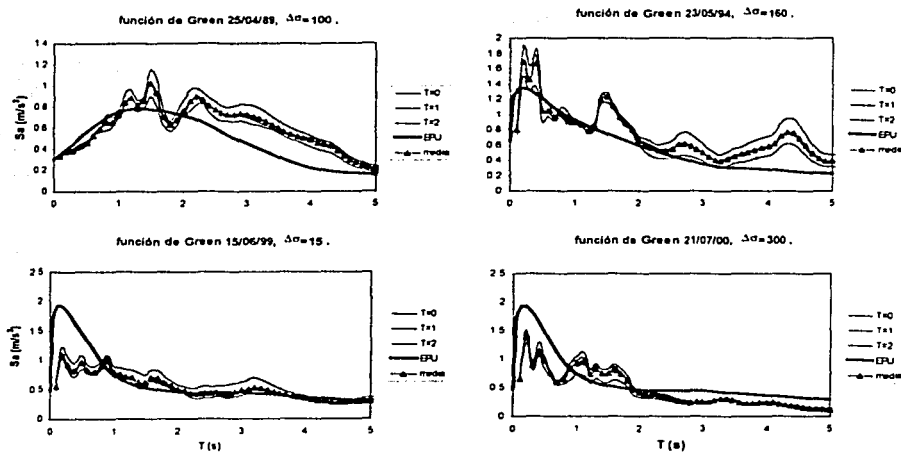
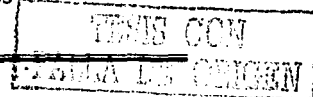


Figura B.22 Espectros de respuesta promedio en CU para un  $T_R = 250$  años





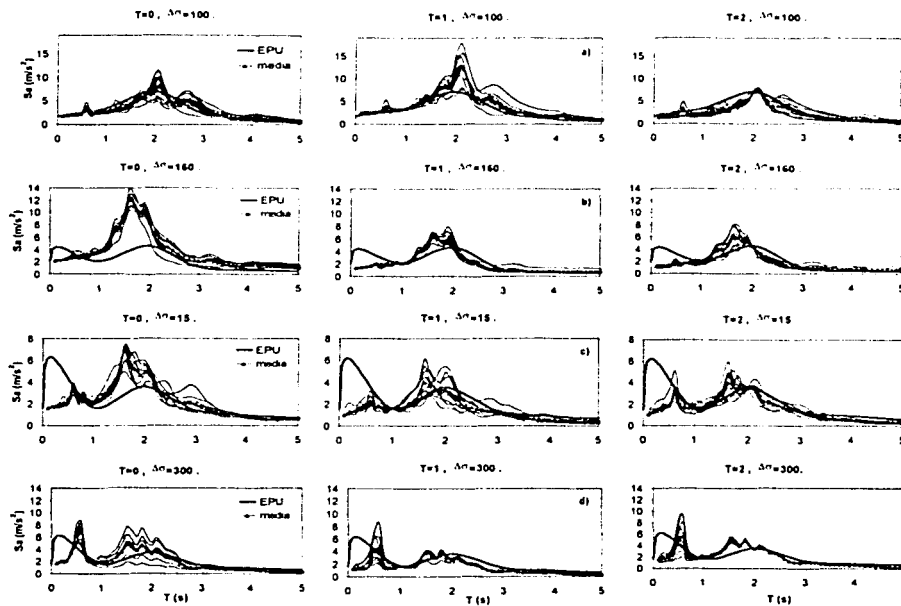


Figura B.23 Espectros de aceleración para diferentes simulaciones en SCT empleando como FGE: a) 25/04/89, b) 23/05/94, c) 15/06/99 y d) 21/07/00; asociados a un  $T_R = 250$  años

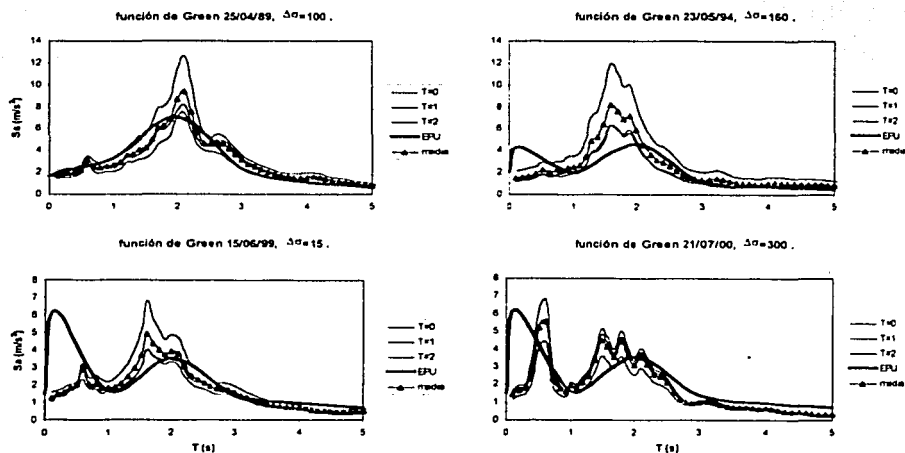


Figura B.24 Espectros de respuesta promedio en SCT para un  $T_R = 250$  años

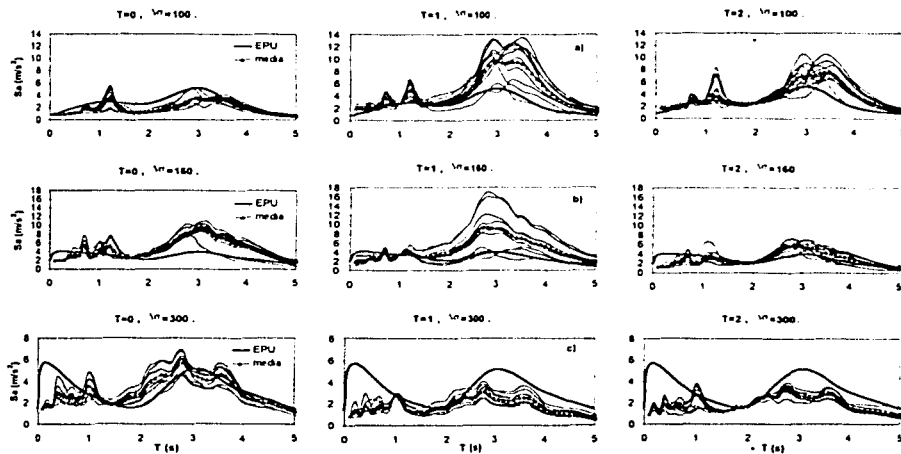


Figura B.25 Espectros de aceleración para diferentes simulaciones en CD empleando como FGE: a) 25/04/89, b) 23/05/94 y c) 21/07/00; asociados a un  $T_R = 250$  años

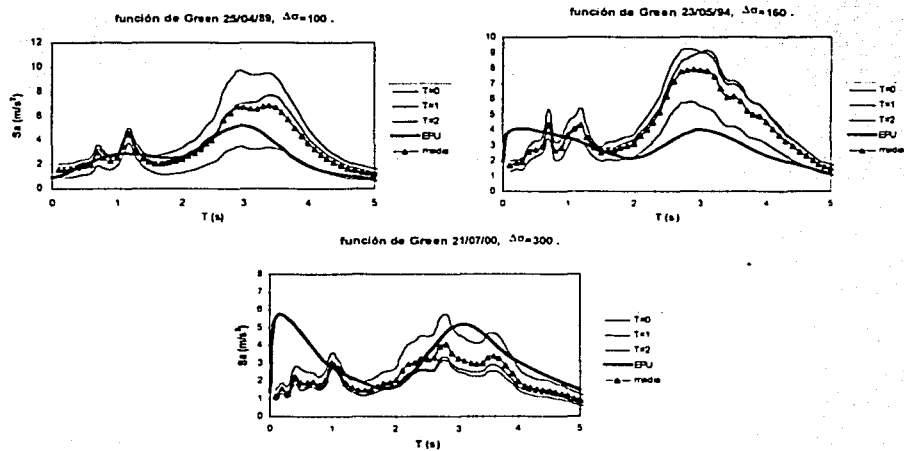


Figura B.26 Espectros de respuesta promedio en CD para un  $T_R = 250$  años

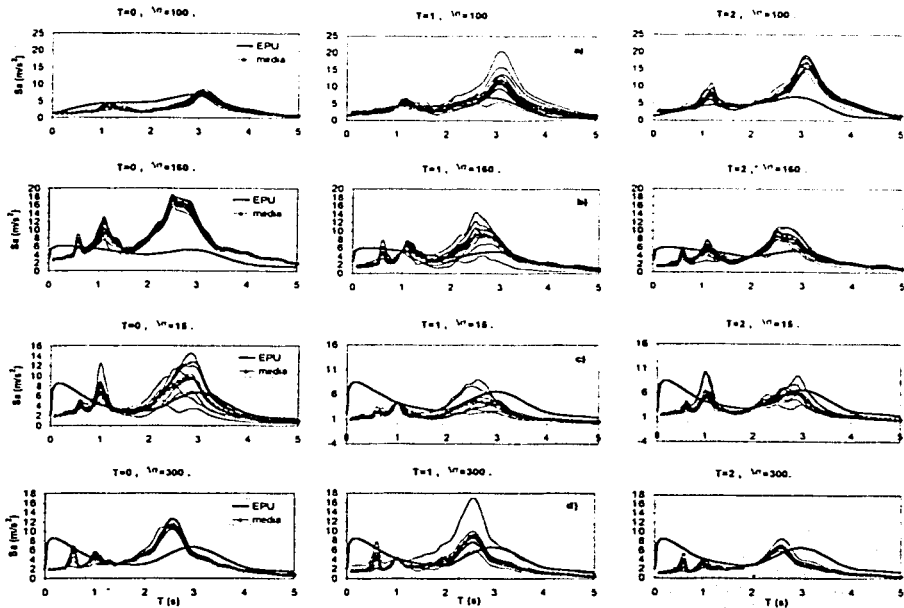


Figura B.27 Espectros de aceleración para diferentes simulaciones en 49 empleando como FGE: a) 25/04/89, b) 23/05/94 c) 15/06/99 y d) 21/07/00; asociados a un  $T_R = 250$  años

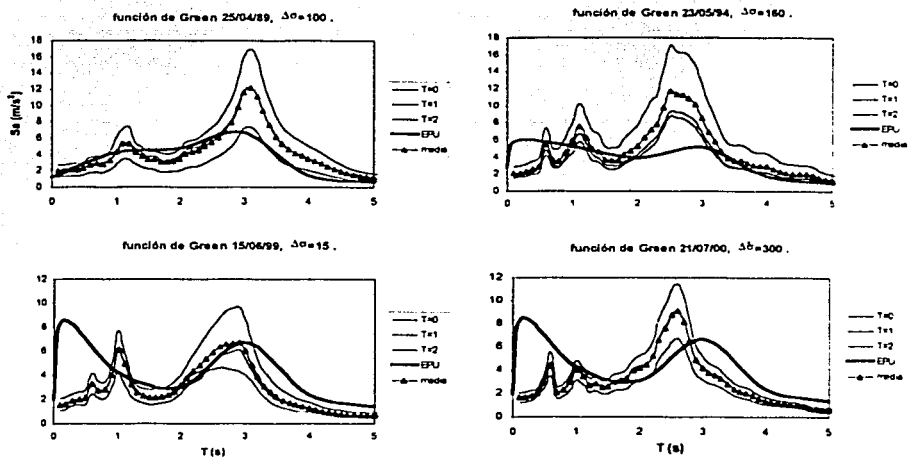


Figura B.28 Espectros de respuesta promedio en 49 para un  $T_R = 250$  años

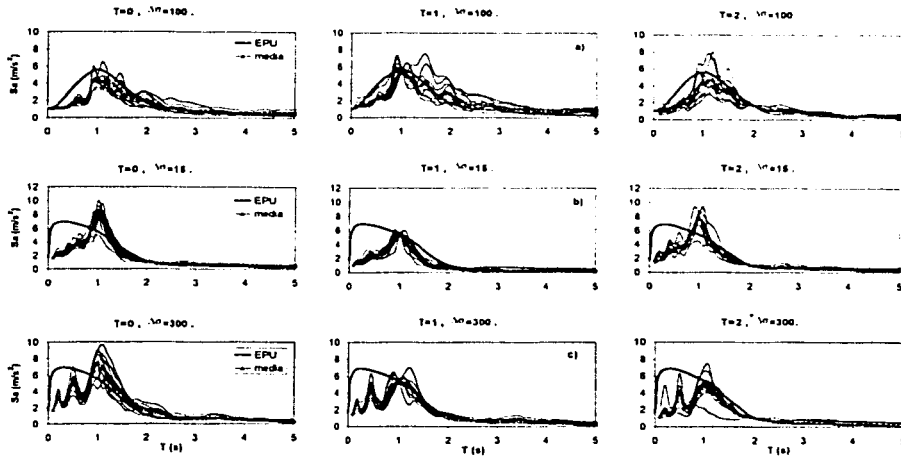


Figura B.29 Espectros de aceleración para diferentes simulaciones en 54 empleando como FGE: a) 25/04/89, b) 15/06/99 y c) 21/07/00; asociados a un  $T_R = 250$  años

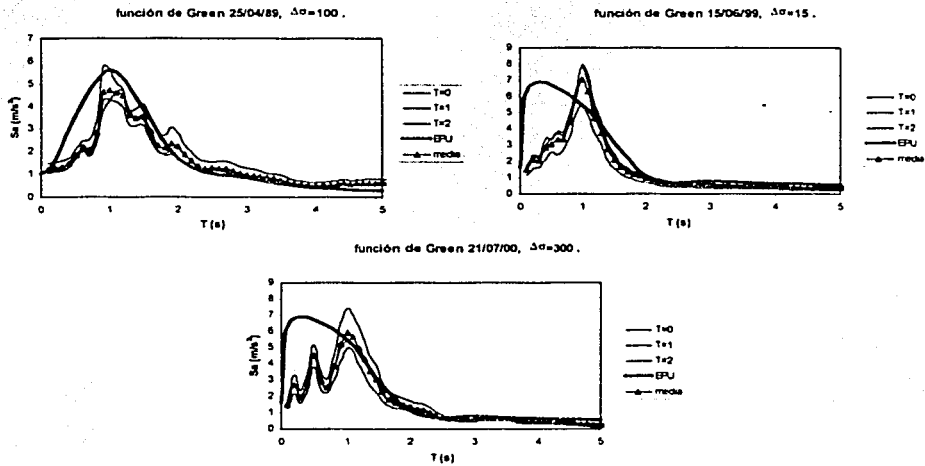


Figura B.30 Espectros de respuesta promedio en 54 para un  $T_R = 250$  años

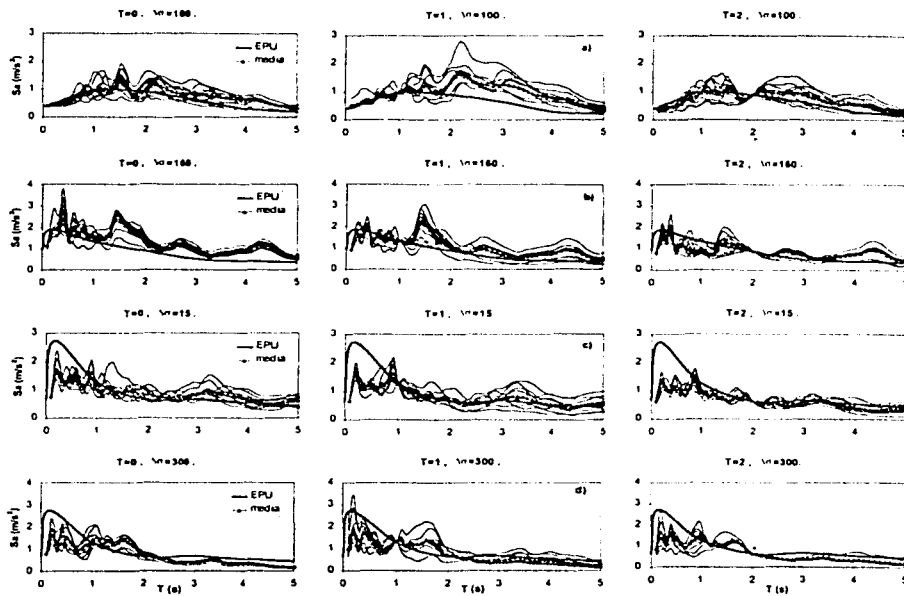


Figura B.31 Espectros de aceleración para diferentes simulaciones en CU empleando como FGE: a) 25/04/89, b) 23/05/94, c) 15/06/99 y d) 21/07/00; asociados a un  $T_R = 475$  años

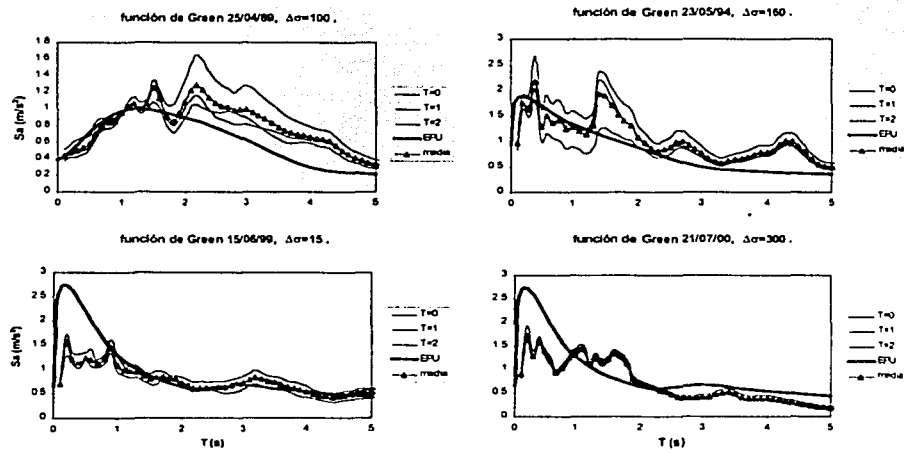
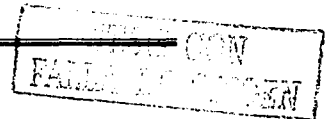


Figura B.32 Espectros de respuesta promedio en CU para un  $T_R = 475$  años



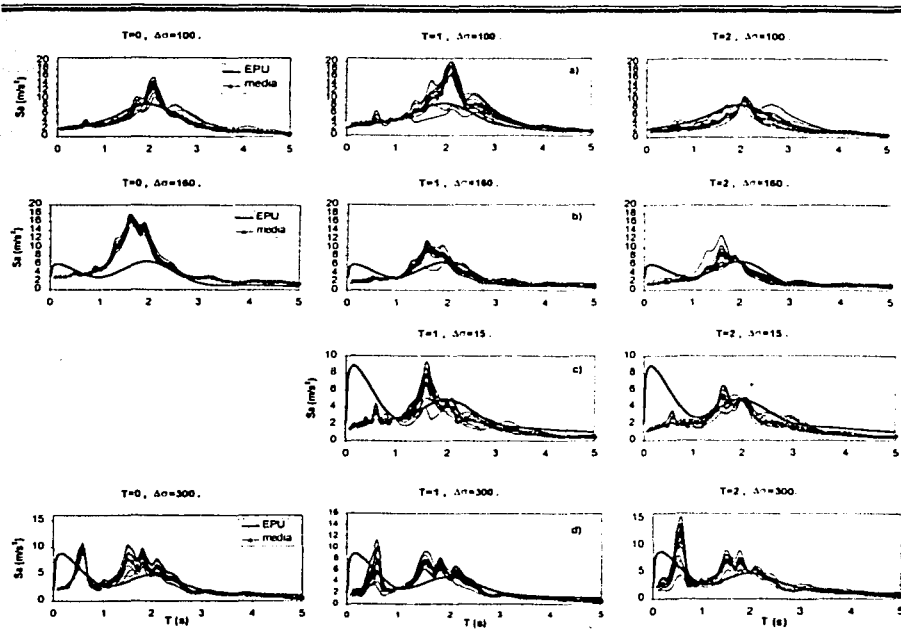


Figura B.33 Espectros de aceleración para diferentes simulaciones en SCT empleando como FGE: a) 25/04/89, b) 23/05/94, c) 15/06/99 y d) 21/07/00; asociados a un  $T_R = 475$  años

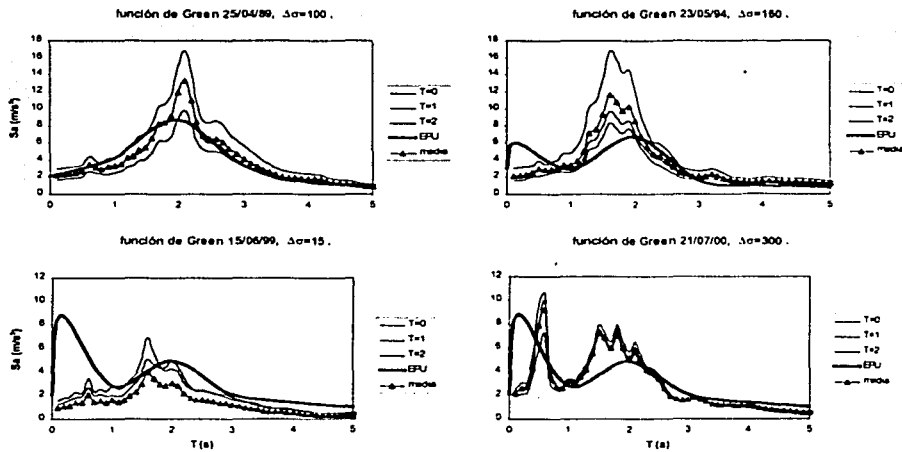
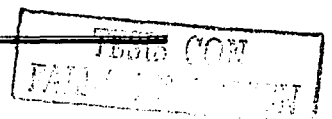


Figura B.34 Espectros de respuesta promedio en SCT para un  $T_R = 475$  años



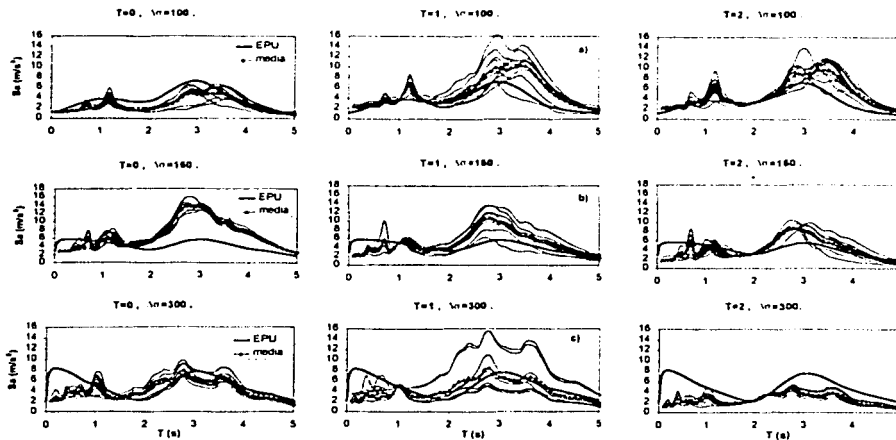


Figura B.35 Espectros de aceleración para diferentes simulaciones en CD empleando como FGE: a) 25/04/89, b) 23/05/94 y c) 21/07/00; asociados a un  $T_R = 475$  años

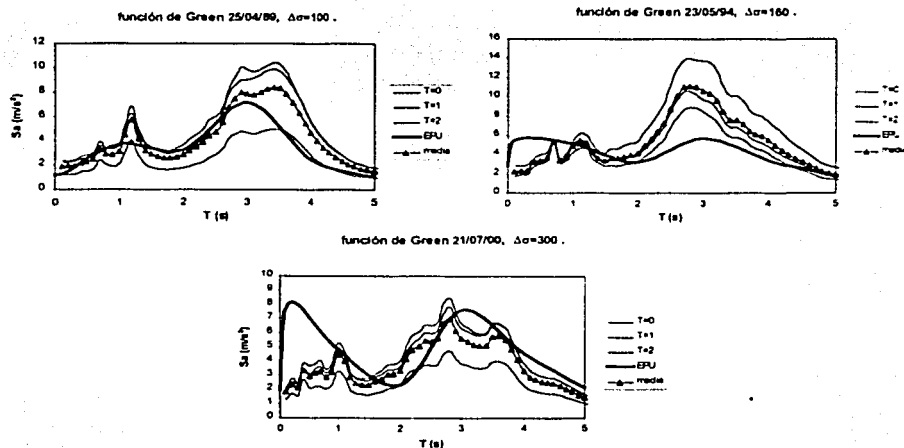


Figura B.36 Espectros de respuesta promedio en CD para un  $T_R = 475$  años

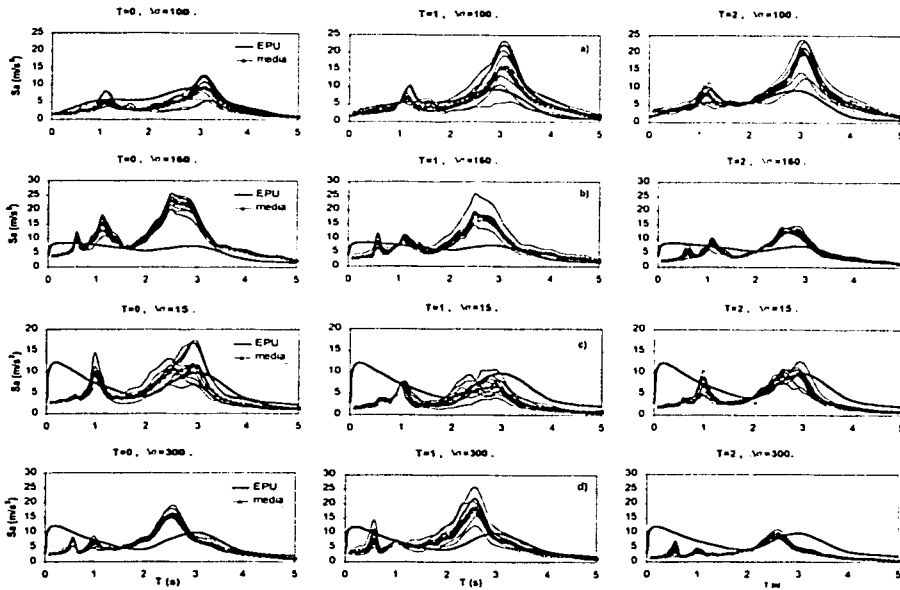


Figura B.37 Espectros de aceleración para diferentes simulaciones en 49 empleando como FGE: a) 25/04/89, b) 23/05/94 c) 15/06/99 y d) 21/07/00; asociados a un  $T_R = 475$  años

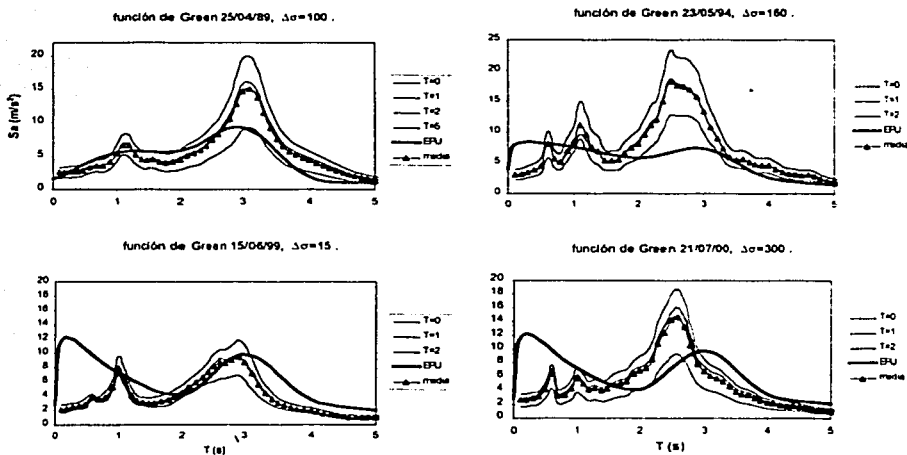
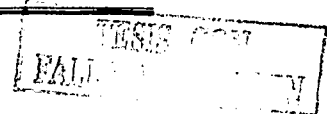


Figura B.38 Espectros de respuesta promedio en 49 para un  $T_R = 475$  años





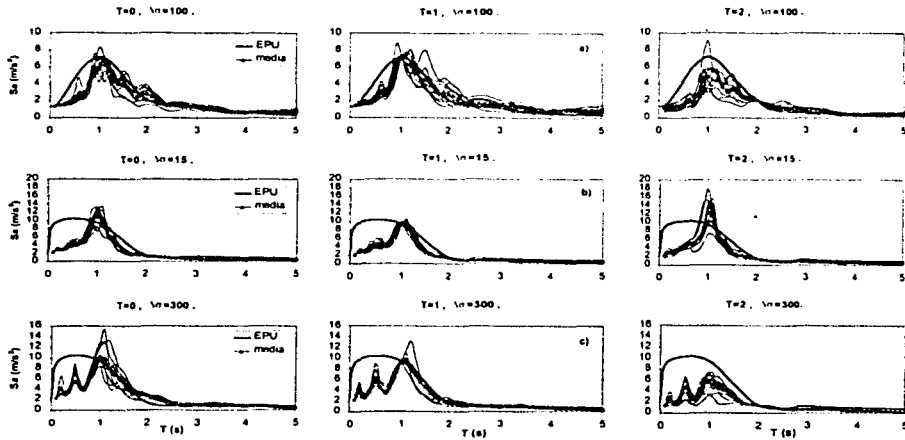


Figura B.39 Espectros de aceleración para diferentes simulaciones en 54 empleando como FGE: a) 25/04/89, b) 15/06/99 y c) 21/07/00; asociados a un  $T_R = 475$  años

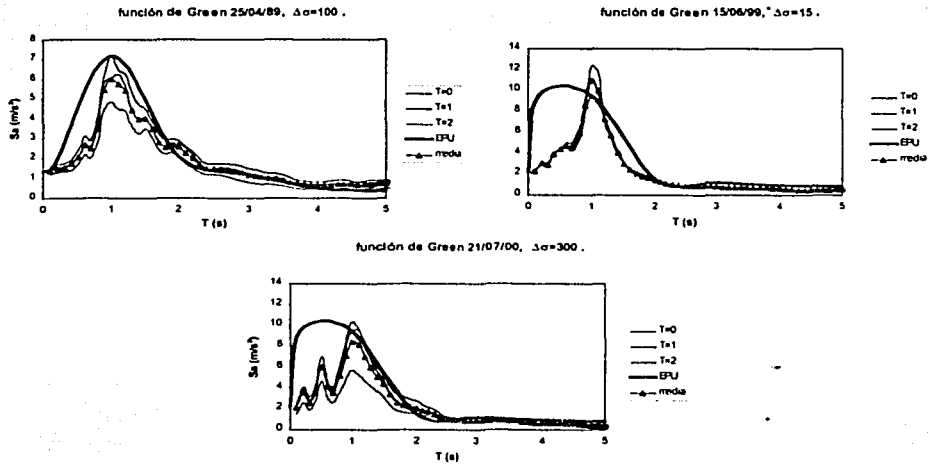
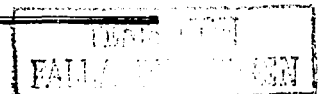


Figura B.40 Espectros de respuesta promedio en 54 para un  $T_R = 475$  años



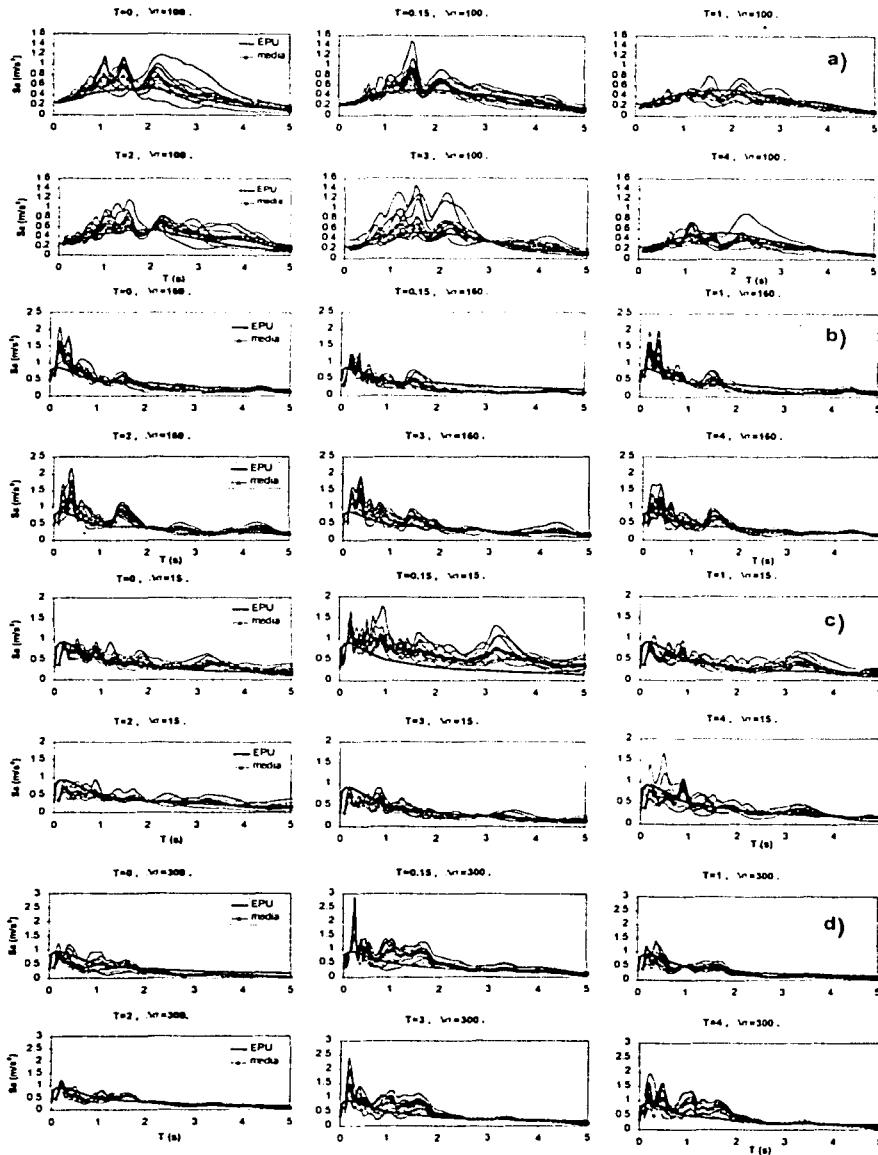


Figura B.41 Espectros de aceleración para diferentes simulaciones en CU empleando como FGE: a) 25/04/89, b) 23/05/94 c) 15/06/99 y d) 21/07/00; asociados a un  $T_R = 125$  años

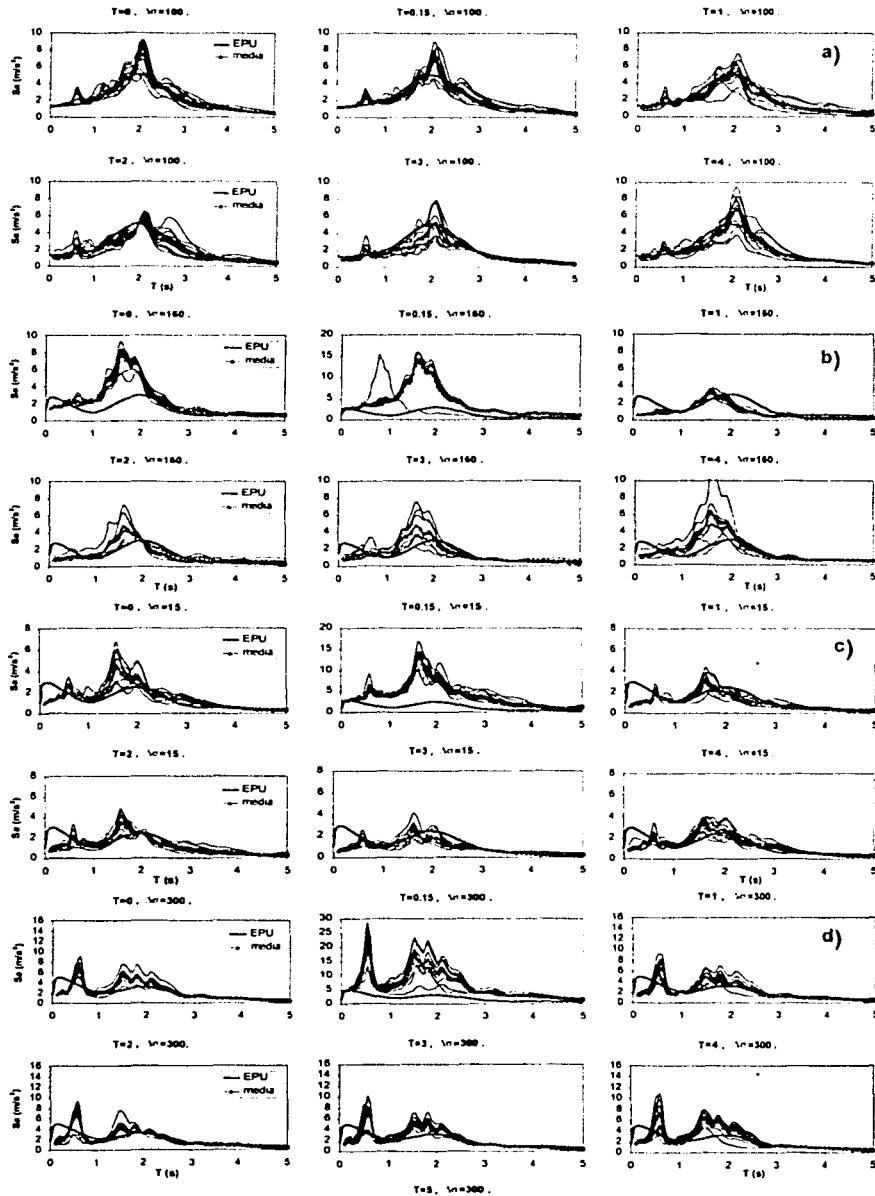


Figura B.42 Espectros de aceleración para diferentes simulaciones en SCT empleando como FGE: a) 25/04/89, b) 23/05/94 c) 15/06/99 y d) 21/07/00; asociados a un  $T_R = 125$  años

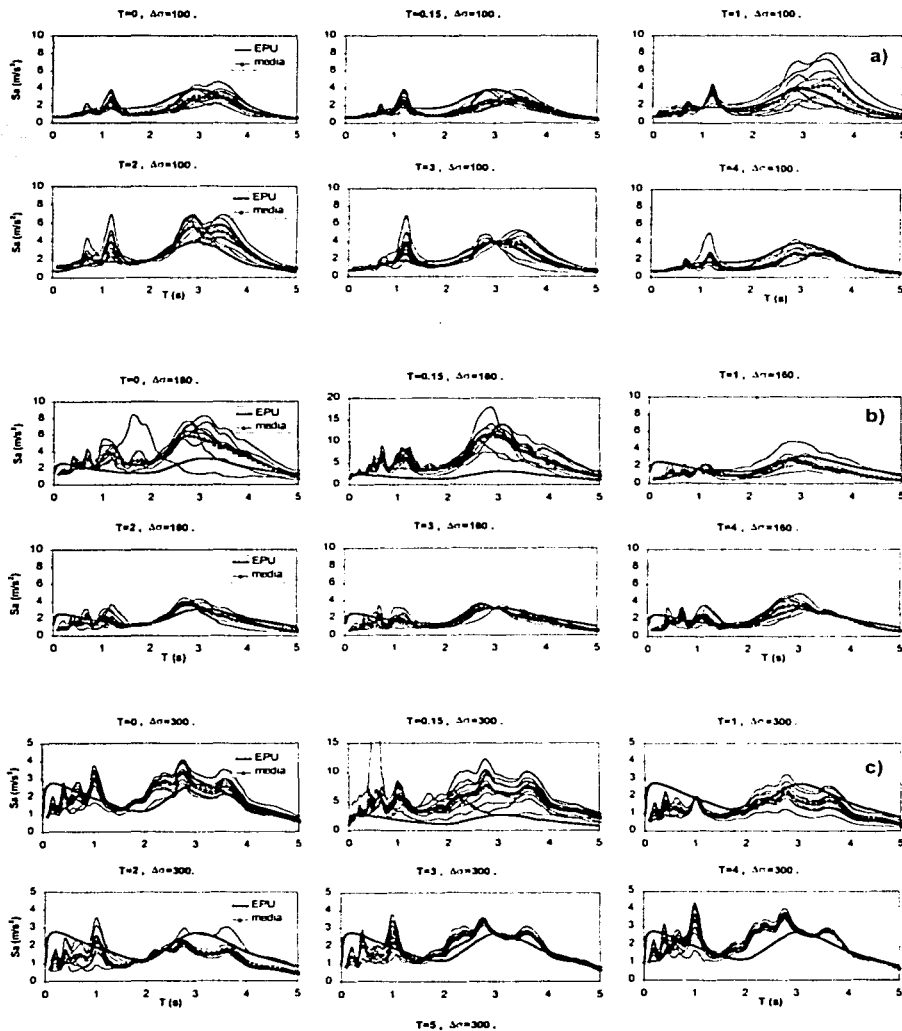


Figura B.43 Espectros de aceleración para diferentes simulaciones en CD empleando como FGE: a) 25/04/89, b) 23/05/94 y c) 21/07/00; asociados a un  $T_R = 125$  años.

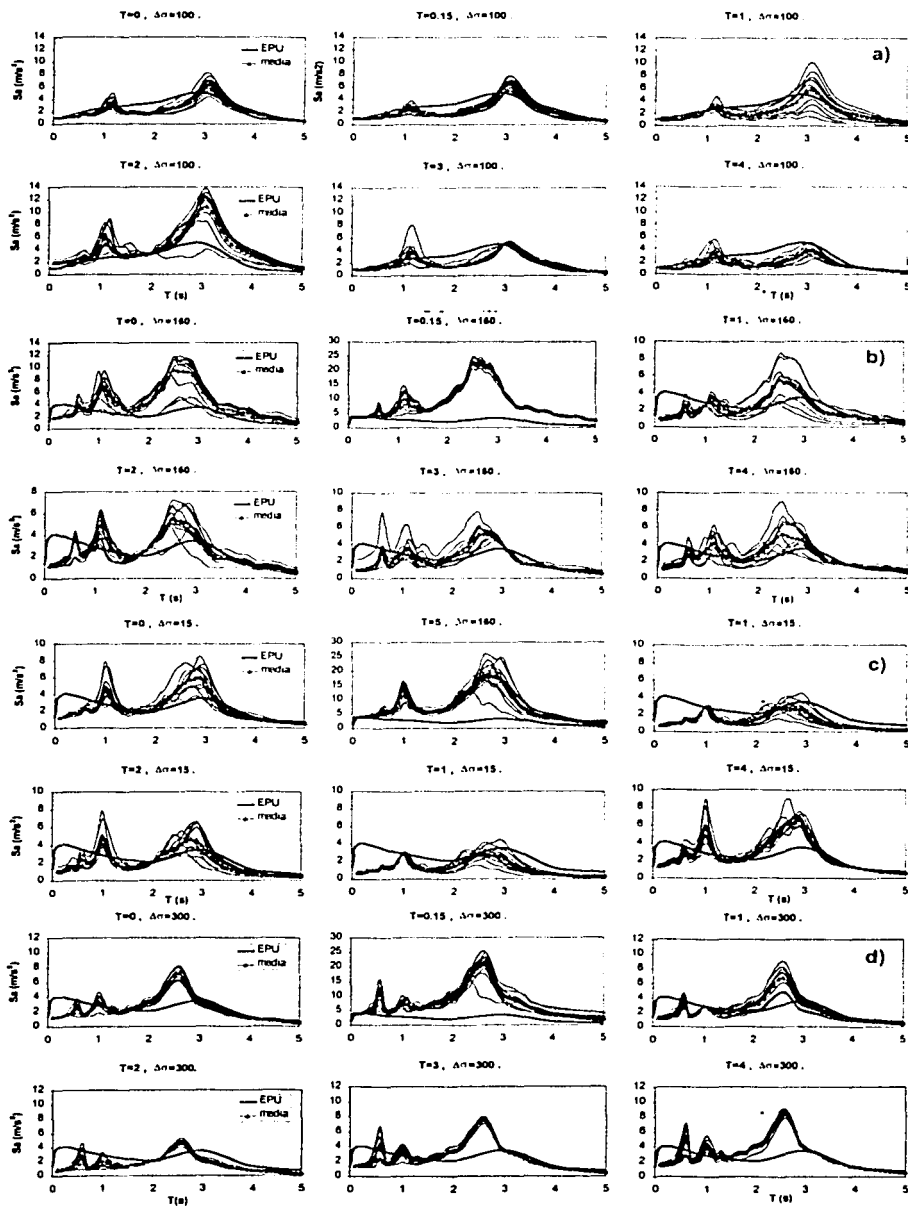


Figura B.44 Espectros de aceleración para diferentes simulaciones en 49 empleando como FGE: a) 25/04/89, b) 23/05/94 c) 15/06/99 y d) 21/07/00; asociados a un  $T_R = 125$  años

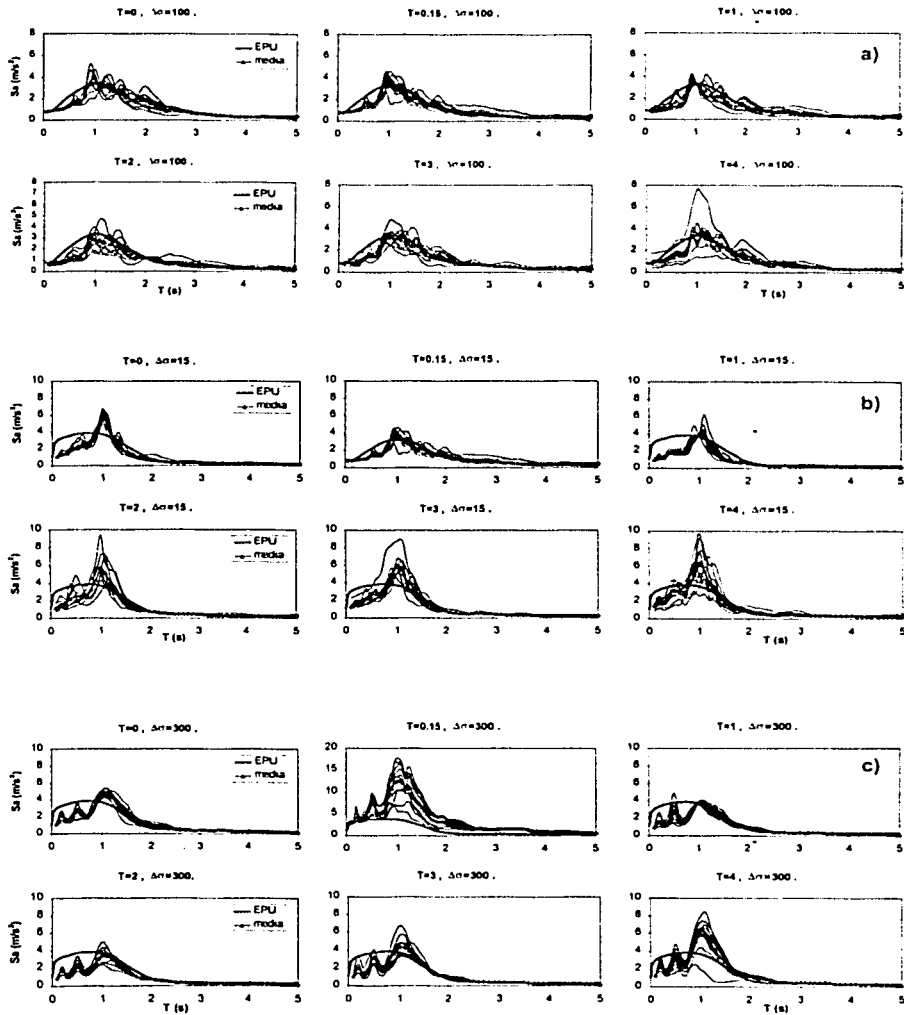


Figura B.45 Espectros de aceleración para diferentes simulaciones en 54 empleando como FGE: a) 25/04/89, b) 15/06/99 y c) 21/07/00; asociados a un  $T_R = 125$  años

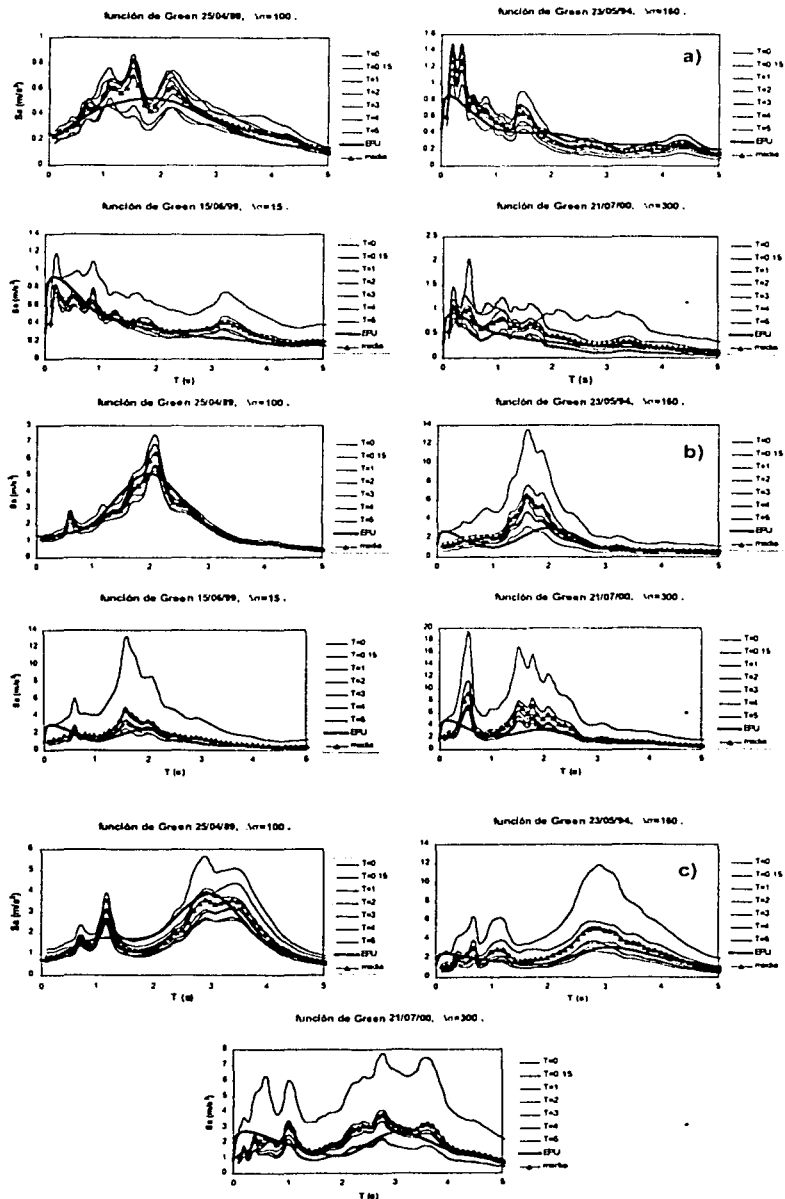


Figura B.46 Espectros de respuesta promedio en los sitios: a) CU, b) SCT y c) CD para un  $T_R = 125$  años

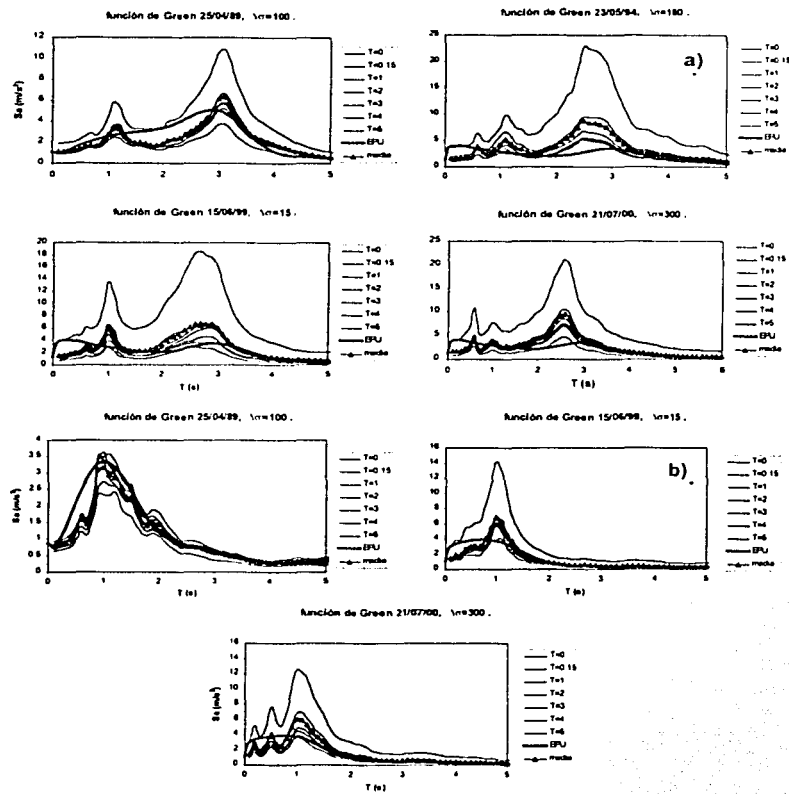


Figura B.47 Espectros de respuesta promedio en los sitios: a) 49 y b) 54 para un  $T_R = 125$  años



## ANEXO C: TAMAÑO, ERROR Y NIVEL DE CONFIANZA MUESTRAL

Dado que en la mayoría de los casos no es posible examinar cada uno de los elementos o individuos que componen una población, ya sea por problemas de tiempo, costos o sencillamente es imposible obtener todos los individuos de la población, se hace necesario recurrir a muestras (subconjuntos de la población) y luego, usando métodos de muestreo estimar las características que nos interesan.

Debido a que la media simple o muestral  $\bar{x}$  es un estimador imparcial de la media poblacional  $\mu$  (Ang y Tang, 1976), el grado de exactitud de este estimador es de interés particular; por esta razón el intervalo sobre el cual un parámetro puede a menudo mentir es usado para complementar la estimación puntual (un número simple) del mismo parámetro; estos intervalos se denominan intervalos de confianza y se pueden interpretar como aquellos en que inferimos que se encuentra la media de la población de donde proviene la muestra.

El objetivo de la estimación de parámetros es inferir, partiendo de la estadística (la media) de una muestra, el parámetro de la población, teniendo en cuenta un error de muestreo. Para estimar  $\mu$ , el estadístico que mejor nos va a ayudar es  $\bar{x}$ , del que conocemos su ley de distribución  $N(\mu, \sigma/\sqrt{N})$ . Esa ley de distribución depende de  $\mu$  (desconocida). Lo más conveniente es hacer que la ley de distribución no dependa de ningún parámetro desconocido, para ello se puede estandarizar o tipificar como sigue (Ang y Tang, 1976):

$$Z = \frac{\bar{X} - \mu}{\underbrace{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}}_{\substack{\text{par. desconocido} \\ + \\ \text{estimador} \\ + \\ \text{cosas conocidas}}}} \sim \underbrace{N(0,1)}_{\text{tabulada}} \quad (\text{C.1})$$

En general, si denotamos  $(1-\alpha)$  como el nivel o intervalo de confianza especificado y  $\pm Z_{\alpha/2}$  como los valores de la variable normal estándar con niveles de probabilidad acumulada  $\alpha/2$  y  $(1-\alpha/2)$ , respectivamente, podemos decir que la probabilidad de que esta variable Z tipificada se encuentre en este intervalo esta dada por la expresión C.2 y se muestra en la figura C.1..

$$P\left(-Z_{\alpha/2} < \frac{\bar{x} - \mu}{\sigma/\sqrt{N}} \leq Z_{\alpha/2}\right) = 1 - \alpha \quad (\text{C.2})$$

de esto se obtiene que:

$$P(\bar{x} - Z_{\alpha/2} \sigma/\sqrt{N} < \mu \leq \bar{x} + Z_{\alpha/2} \sigma/\sqrt{N}) = 1 - \alpha \quad (\text{C.3})$$

y el intervalo de confianza para la media poblacional  $\mu$ , estará dado por:

$$(\mu)_{1-\alpha} = (\bar{x} - Z_{\alpha/2} \sigma/\sqrt{N}; \bar{x} + Z_{\alpha/2} \sigma/\sqrt{N}) \quad (\text{C.4})$$

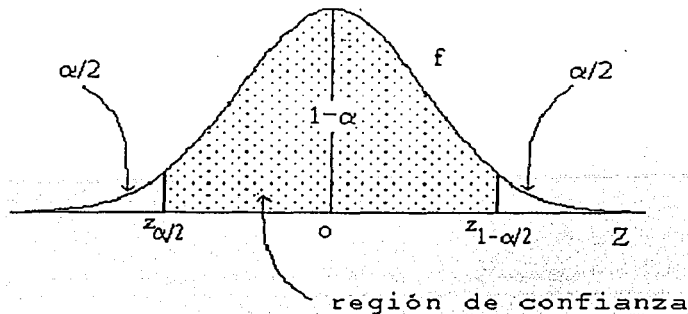


Figura C.1 Función de densidad de probabilidad de Z.

El intervalo de  $100\%(1-\alpha)$  de confianza para  $\mu$  indica que el error de estimación que cometemos al usar  $\bar{X}$  para estimar el valor de la media poblacional está dado por la expresión C.5 (Ang y Tang, 1976 y Spiegel, 1978). A este error es la máxima diferencia que podemos aceptar entre la estimación puntual del parámetro poblacional y el verdadero valor de dicho parámetro. Por lo tanto si se desea estimar una media con un error ( $e$ ) que no sea mayor que un valor prefijado, se puede emplear esta expresión.

$$e = Z_{\alpha/2} \sigma \sqrt{N} \quad (C.5)$$

En el tamaño de una muestra ( $N$ ) para determinar una media intervienen: el máximo error permisible ( $e$ ), el nivel de confianza deseado ( $\alpha$ ) y la desviación estándar de la media poblacional ( $\sigma$ ) (ver expresión C.6).

$$N = Z_{\alpha/2}^2 \sigma^2 e^{-2} \quad (C.6)$$

Shome y otros (1998 y 1999) estudiaron como estimar de forma precisa y eficiente diferentes medidas inelásticas de daño a ser esperadas en estructuras de múltiples grados de libertad (MDOF), sujetas a un evento sísmico específico, conocida su magnitud y distancia. Esta respuesta no lineal estructural es estudiada respecto a problemas comunes de ingeniería y sismología como la selección y número de registros empleados en el análisis; para ello se pone especial interés al escalamiento de registros, sensibilidad de los resultados a la magnitud y distancia del evento, exactitud de los resultados dado un número limitado de registros y la amplia dispersión de los mismos.

En la medida del daño inelástico de las estructuras Shome y otros (1998 y 1999) emplearon la mediana de la respuesta y como medida de dispersión ( $\delta$ ) utilizaron la desviación estándar del logaritmo natural de los datos. Se encontró que la respuesta medida (daño) de una estructura ante diferentes registros, agrupados considerando un intervalo pequeño de magnitudes y distancias, presenta gran dispersión. Concluyeron que cuando los registros son normalizados o escalados por ejemplo, a la aceleración espectral media del grupo en la frecuencia fundamental de la estructura, se obtiene el mismo valor para la medida del daño con una dispersión menor que la obtenida para los registros no escalados.

Lo anterior lleva a que, por medio de un escalamiento adecuado, se reduzca la dispersión de la respuesta medida a la mitad y por lo tanto, para un mismo ancho de banda de confianza sobre la

media (error estándar) aceptable ( $e = \pm 10\%$ ), se reduzca el tamaño muestral o el número de registros necesarios para un análisis por un factor de 4 (Shome y otros, 1998 y 1999). Esto indica que los resultados de un registro son tan efectivos como los de cuatro registros, si primero lo escalamos adecuadamente, por ejemplo a la intensidad media espectral del grupo correspondiente. Los autores consideran como aproximación al error estándar, la relación entre la dispersión simple ( $\sigma$ ) expresada como porcentaje y  $N^{0.5}$ . La expresión C.7 es empleada por los autores y considerada en este trabajo, para determinar el número de registros necesarios para tener una banda de confianza considerando un error del estimador de  $\pm 10\%$ .

$$N = \frac{\delta^2}{e^2} = \frac{\delta^2}{(0.1)^2} \quad (C.7)$$

