



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**"ACELEROGRAMAS DE DISEÑO
EN SITIOS AFECTADOS POR
VARIAS FUENTES SÍSMICAS"**

T E S I S
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA
ESTRUCTURAS

P R E S E N T A :
MIGUEL ÁNGEL JAIMES TÉLLEZ

DIRECTOR DE TESIS: DR. EDUARDO REINOSO ÁNGULO



CIUDAD UNIVERSITARIA, FEBRERO 2007



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: **Dr. Esteva Maraboto Luis**

Secretario: **Dr. García Pérez Jaime**

1^{er.} Vocal: **Dr. Reinoso Angulo Eduardo**

2^{do.} Vocal: **Dra. Ruiz Gómez Sonia Elda**

3^{er.} Vocal: **Dr. Ordaz Schroeder Mario Gustavo**

1^{er.} Suplente: **Dr. Aguirre Gonzalez Jorge**

2^{do.} Suplente: **Dr. Alamilla Lopez Jorge L.**

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO

TUTOR DE TESIS:

EDUARDO REINOSO ANGULO

FIRMA

*Para mi amada esposa Kochill Marlette
Lobato Valverde y mi adorada hija
Sara Faimés Lobato; las dos mujeres
que hacen sentido a mi vida*

AGRADECIMIENTOS

La elaboración de este trabajo no habría sido posible sin la preparación y apoyo provistos por la Universidad Nacional Autónoma de México y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). A la primera institución por enseñarme que el conocimiento y el valor del espíritu humano hacen seres humanos libres y trascendentes en el tiempo, y a la segunda por seguir impulsando la investigación en este país.

Al Instituto de Ingeniería, por ser la impulsora en la investigación científica teórica y aplicada de la ingeniería en México, y por permitirme llegar todos los días durante tres años al cubículo 102 y realizar de manera exitosa este documento.

Al Dr. Eduardo Reinoso Angulo, por el incansable apoyo y los consejos que hicieron posible concluir este trabajo. Asimismo, por su fina atención antes, durante y después del doctorado.

Al Dr. Mario Ordaz Schroeder, por sus valiosos y atinados consejos para llevar a buen término este documento.

Al Dr. Luis Esteva Maraboto, por su paciencia y finos comentarios técnicos al respecto.

A la Dra. Sonia Elda Ruiz Gómez, por sus observaciones al realizar la revisión de este documento.

A Dr. Jaime García Pérez, Dr. Jorge L. Alamilla Lopez y Dr. Jorge Aguirre González por la revisión exhaustiva del documento y sus comentarios atinados al respecto.

A todos mis amigos del Instituto de Ingeniería (Omar, Cesar, Jorge, Arturo, Esteban, Carlos, Marco, Vicente, July y Maurico y los que me falten por mencionar.); de quienes aprecio su amistad, durante estos 3 años, un poco más, que tarde para terminar los estudios de doctorado.

A mi esposa, por todo el amor, paciencia e incansable ayuda para finalizar el doctorado. Gracias, por todo mi amor.

ÍNDICE

Introducción	i
RESUMEN	
1. Comparación de los sismos de subducción y falla normal en el valle de México	1
1.1 Sismos de subducción y falla normal	1
1.2 Leyes de atenuación para sismos de subducción y falla normal en la Ciudad de México	1
1.2.1 Ley de atenuación para sismos de subducción	2
1.2.2 Ley de atenuación para sismos de falla normal	2
1.3 Diferencias observadas en edificios instrumentados ante sismos de subducción y falla normal	2
1.3.1 Edificio PC	3
1.3.2 Edificio MJ	4
1.3.3 Edificio PI	4
1.4 Discusión	5
2. Métodos para estimar espectros de respuesta	14
2.1 Importancia de predecir espectros de respuesta dada una magnitud y distancia	14
2.2 Predicción de espectros de respuesta en sitios instrumentados	14
2.2.1 Método 1: Regresión bayesiana del espectro de respuesta	15
2.2.2 Método 2: Regresión bayesiana del espectro de amplitudes de Fourier y uso de la teoría de vibraciones aleatorias	15
2.2.3 Método 3: Regresión bayesiana del ER en CU y cociente espectral de respuesta	15
2.2.4 Método 4: Regresión bayesiana del EAF en CU, función de transferencia empírica y teoría de vibraciones aleatorias	16
2.3 Predicción de espectros de respuesta en sitios no instrumentados	16
2.4 Discusión	17
3. Funciones de Green empíricas modificadas por atenuación para sitios distantes de la fuente	18
3.1 Importancia de la técnica de simulación de funciones de Green empíricas	18
3.2 Descripción del método de funciones de Green empíricas modificadas por atenuación	18
3.3 Ejemplos	19
3.3.1 Sismo del 19 de Septiembre de 1985	19
3.3.2 Sismo del 14 de Septiembre de 1995	19
3.3.3 Sismo del 23 de Mayo de 1994	20
3.4 Discusión	20
4. Métodos para generar acelerogramas con propósitos de diseño estructural	31
4.1 Métodos existentes	31
4.2 Método 1: Escalar acelerogramas hasta alcanzar un nivel de intensidad requerido	32
4.3 Método 2: Simular movimientos sísmicos compatibles con un espectro de diseño	33

4.4 Método 3: Desarrollar funciones de atenuación generalizadas	33
4.5 Método 4: Usar método estocástico	33
4.6 Método 5: Utilizar técnica de funciones de Green empíricas	34
4.7 Discusión	34
5. Acelerogramas de diseño en sitios afectados por varias fuentes sísmicas: el caso de terreno firme en la Ciudad de México	52
5.1 Importancia de los acelerogramas con propósitos de diseño	52
5.2 Metodología propuesta	53
5.3 Ejemplo de aplicación. Terreno firme de la Ciudad de México	53
5.3.1 Fuentes sísmicas	53
5.3.2 Espectro de peligro uniforme	54
5.3.3 Desagregación probabilística del peligro sísmico	55
5.3.4 Simulación de acelerogramas que ajusten al EPU	56
5.4 Discusión	58
CONCLUSIONES	60
REFERENCIAS	65
APÉNDICES	

I. COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE EDIFICIOS EN EL VALLE DE MÉXICO ANTE SISMOS DE SUBDUCCIÓN Y DE FALLA NORMAL. Por Miguel A. Jaimes y Eduardo Reinoso. *Aceptado en la Revista de Ingeniería Sísmica*

II. COMPARISON OF METHODS TO PREDICT RESPONSE SPECTRA AT INSTRUMENTED SITES GIVEN THE MAGNITUDE AND DISTANCE OF AN EARTHQUAKE. Por Miguel A. Jaimes, Eduardo Reinoso y Mario Ordaz. *Aceptado en el Journal of Earthquake Engineering*

III. EMPIRICAL GREEN'S FUNCTIONS MODIFIED BY ATTENUATION FOR SOURCES LOCATED AT INTERMEDIATE AND FAR DISTANCES FROM THE ORIGINAL SOURCE. Por Miguel A. Jaimes, Eduardo Reinoso y Mario Ordaz. *Aceptado en el Journal of Earthquake Engineering*

IV. A PROPOSAL TO OBTAIN DESIGN ACCELEROGRAMS AT SITES AFFECTED BY SEVERAL SEISMIC SOURCES: THE CASE OF HARD SOIL IN MEXICO CITY. Por Miguel A. Jaimes y Eduardo Reinoso. *Enviado al Earthquake Spectra*

INTRODUCCIÓN

En algunos casos, especialmente cuando es necesario evaluar la respuesta en el rango inelástico de estructuras importantes o los contenidos no estructurales, no es suficiente sólo definir el movimiento sísmico en términos de un espectro de diseño que consideran fuerzas relacionadas a parámetros de respuesta máxima como la aceleración espectral y el desplazamiento. Estos parámetros no siempre tienen una correlación directa con pérdida y daño; es más, el daño acumulado o degradación producida por el comportamiento de histéresis debido al movimiento sísmico severo en un solo evento y durante la vida útil de la estructura no puede ser considerado. Por ello, deben usarse acelerogramas en el diseño de estructuras importantes y complejas como las presas, puentes, edificios altos o irregulares, estructuras donde varios modos de vibración pudieran ser importantes y estructuras diseñadas para tener demandas altas de ductilidad.

Estos acelerogramas deben reproducir tan bien como sea posible el movimiento esperado en el sitio. Este movimiento debe tener en cuenta la influencia de parámetros tales como la magnitud, la distancia, el mecanismo de falla y efectos del sitio. Desgraciadamente, los códigos disponibles y manuales son vagos y solo mencionan que los acelerogramas deben ser compatibles con el espectro de diseño y apropiados a la situación. El criterio implementado por los reglamentos actuales no contiene información suficiente para los ingenieros, por lo que ellos no pueden usar métodos prácticos para generar acelerogramas de diseño y terminan usando cualquiera que esté disponible y, en muchos casos, poco útil para la estructura que ellos están analizando.

En este trabajo se presentan criterios encaminados a obtener acelerogramas con propósitos de diseño en sitios afectados por varias fuentes sísmicas.

En el **Capítulo 1** se presenta la importancia para los ingenieros de usar acelerogramas para analizar sus estructuras, considerando que cada sitio es afectado por muchas fuentes sísmicas, y por lo tanto se necesitan varios acelerogramas para predecir la respuesta que la estructura tendrá en su vida útil. Es más, es posible esperar movimientos sísmicos diferentes debido a las variaciones e incertidumbres en los parámetros sismológicos. Se estiman leyes de atenuación para terreno firme (CU) y dos sitios en zona de lago (SCT y CD) de la Ciudad de México ante sismos de subducción y falla normal. Posteriormente, se realiza un estudio comparativo del comportamiento que presentan algunas estructuras desplantadas en distintos sitios del valle de México mediante la aplicación de un modelo simplificado ante eventos sísmicos simulados y registrados de subducción y falla normal. Se usa el método de simulación de funciones de Green empíricas. Se analiza el comportamiento elástico estructural considerando dos tipos de deformación lateral: como viga de flexión y como viga de cortante, y se comparan los resultados en términos de los espectros de respuesta inelásticos, de la energía de entrada y de la energía histéretica normalizada de un sistema de un grado de libertad (1GDL). Los resultados muestran que un sismo de falla normal, debido al mayor contenido de alta frecuencia, provoca que los modos superiores de la estructura tengan mayor participación, lo que origina mayores intensidades en estructuras de periodo corto. Esto podría provocar mayores daños tanto en el edificio como en sus contenidos con respecto a un sismo de tipo subducción. Para fines

prácticos, se recomienda utilizar acelerogramas de diseño tanto de sismos de subducción como de falla normal y poder así evaluar mejor la respuesta estructural y el daño que ambos podrían provocar.

En el **Capítulo 2** se estudian métodos para obtener espectros de respuesta dada una magnitud y distancia en un sitio. El estudio tiene la finalidad de determinar leyes de atenuación tanto en terreno firme como en terreno blando, que nos permitan determinar el peligro sísmico en el sitio. Primero, se comparan cuatro métodos, todos basados en regresiones Bayesianas, para predecir espectros de respuesta en sitios instrumentados, localizadas en zona de lomas y de lago en la Ciudad de México, que hayan registrado varios sismos recientes. Las regresiones se construyen en función de magnitud y distancia cercana al área de ruptura del sismo, usando más de 20 sismos registrados desde 1964. Los cuatro métodos son: (1) una regresión con espectros de respuesta observados; (2) una regresión con espectros de amplitudes de Fourier observados y uso de la teoría de vibración aleatorias para estimar los espectros de respuesta, (3) una regresión de los espectros de respuesta observados en la estación de zona de lomas de referencia multiplicada por el cociente espectral de respuesta; y (4) una regresión con los espectros de amplitudes de Fourier en la zona de lomas de referencia, multiplicado por la función de transferencia empírica y el uso de la teoría de vibración aleatorias para estimar espectros de respuesta. Segundo, se explica un método para obtener leyes de atenuación en sitios de terreno blando instrumentados y no instrumentados basados en leyes de atenuación existentes de terreno firme.

En el **Capítulo 3** se estudia la técnica de funciones de Green empíricas para obtener historias de tiempo de aceleración para ser usadas en un diseño sísmico que sea consistente con un escenario sísmico, definido, por ejemplo, en términos de la magnitud máxima creíble localizada a una distancia determinada. Se presenta un esquema para modificar la función de Green empírica por efectos de atenuación. Los cuatro factores considerados son: (1) atenuación geométrica, (2) decaimiento de alta frecuencia, (3) atenuación regional y (4) fase de la señal. Las intensidades calculadas con el método de simulación son comparadas con sismos registrados de tipo subducción (mecanismo de falla inversa) y de profundidad intermedia (mecanismo de falla normal). Se presentan con datos de sismos mexicanos que el esquema planteado muestra una buena aproximación entre movimientos observados y simulados en sitios intermedios y distantes de la fuente sísmica.

En el **Capítulo 4** se comparan cinco métodos para obtener acelerogramas con propósitos de diseño. Los métodos son: (1) escalando acelerogramas existentes en el sitio hasta un nivel requerido de intensidad, (2) simulando movimientos sísmicos compatibles con un espectro de diseño o un espectro de respuesta requerido, (3) usando funciones de atenuación generalizada, (4) aplicando un método estocástico y (5) usando la técnica de simulación de funciones de Green empíricas. Se usan datos del sismo del 19 de Septiembre de 1985 para comparar la aproximación entre los movimientos observados y calculados con cada uno de los métodos.

En el **Capítulo 5** se estudia cómo obtener acelerogramas de diseño en sitios afectados por varias fuentes sísmicas. Para ello, primero se calcula el peligro sísmico probabilístico (*Probabilistic Seismic Hazard Assessment*, PSHA) para determinar las fuentes sísmicas principales que afectan al sitio. Y posteriormente, realizando una evaluación de desagregación probabilística del peligro sísmico (*Disaggregation Probabilistic Seismic Hazard Assessment*, DPSHA) obtenemos los valores de magnitud y distancia más probables para generar movimientos sísmicos cuyo valor de intensidad (ordenada espectral) se asocia a una tasa excedencia dada. Para aplicar el PSHA y la DPSHA en un sitio es necesario contar con una (o varias) ley(es) de atenuación de la(s) región(es) sísmica(s) que afecta(n) al sitio. Por otro lado, para generar los movimientos en estos sitios se usa la técnica de simulación de funciones de Green empíricas modificada para tomar en cuenta la atenuación.

Finalmente, se propone cómo obtener movimientos apropiados de diseño sísmico, incluyendo como ejemplo el caso de terreno firme al sur de Ciudad de México, por ser un caso excelente de un lugar afectado por muchas fuentes sísmicas.

Al final de cada uno de los capítulos de la tesis se presenta una discusión sobre las limitaciones y posibles trabajos que se sugiere deben ser realizados.

El contenido de este trabajo, está centrado principalmente en los apéndices, en ellos se muestran estudios detallados de los tópicos que se presentan en cada uno de los capítulos. Los textos presentados en los apéndices, representan algunos artículos arbitrados, de los cuales algunos han sido aceptados para su publicación en revistas de circulación nacional e internacional, y otros se encuentran enviados. Debido a los fines del presente estudio se consideró adecuado incluirlos.

RESUMEN

En este trabajo se muestra que un sismo de falla normal, debido al mayor contenido de alta frecuencia, provoca que los modos superiores de estructuras ubicadas en el Valle de México tengan mayor participación, lo que origina mayores intensidades en estructuras de periodo corto. Esto podría provocar mayores daños tanto en el edificio como en sus contenidos con respecto a un sismo de tipo subducción. Se recomienda utilizar acelerogramas de diseño tanto de sismos de subducción como de falla normal y poder así evaluar mejor la respuesta estructural y el daño que ambos podrían provocar. Por lo tanto, se estudia en el trabajo cómo obtener acelerogramas de diseño en sitios afectados por varias fuentes sísmicas. Para ello, primero se realiza un análisis probabilístico del peligro sísmico (*Probabilistic Seismic Hazard Assessment*, PSHA) para determinar las principales fuentes sísmicas que afectan al sitio. Posteriormente, realizando una evaluación de desagregación probabilística del peligro sísmico (*Disaggregation Probabilistic Seismic Hazard Assessment*, DPSHA) obtenemos los valores más probables de magnitud y distancia para generar movimientos sísmicos cuyo valor de intensidad (ordenada espectral) se asocia a una tasa de frecuencia dada. Pero para aplicar el PSHA y la DPSHA en un sitio es necesario contar con una (o varias) ley(es) de atenuación representativa(s) de la(s) región(es) sísmica(s) que afecta(n) al sitio. Por ello, se estudian métodos para obtener intensidades espectrales en sitios instrumentados y no-instrumentados dada una magnitud y distancia. Por otro lado, para generar los movimientos, dada una magnitud y distancia, en estos sitios se plantea y se usa una expresión para modificar la función de Green empírica por atenuación en sitios distantes de la fuente sísmica. Finalmente, se propone cómo obtener movimientos apropiados de diseño sísmico, incluyendo como ejemplo el caso de terreno firme al sur de Ciudad de México, por ser un caso excelente de un lugar afectado por muchas fuentes sísmicas.

Capítulo 1

Comparación de los sismos de subducción y falla normal en el valle de México

En este capítulo se señalan algunas diferencias que existen entre los sismos de subducción y de profundidad intermedia. Se estiman leyes de atenuación para CU, SCT y CD en la Ciudad de México ante sismos de subducción y falla normal. Se estudia el comportamiento de algunos edificios instrumentados de la Ciudad de México ante este tipo de eventos sísmicos. Las diferencias, como se observará, resultan relevantes en el comportamiento que tendrá la estructura durante su vida útil. Por ello, se recomienda, utilizar acelerogramas de diseño tanto de sismos de subducción como de profundidad intermedia y poder así evaluar mejor la respuesta estructural y el daño que ambos podrían provocar en estructuras y contenidos de la Ciudad de México.

1.1 Sismos de subducción y falla normal

Los sismos de subducción son los eventos sísmicos más estudiados en México por su frecuencia y magnitud y por la gran probabilidad de que pueda ocurrir en un futuro no lejano un evento sísmico que podría superar lo ocurrido en 1985. Sin embargo, a lo largo de la historia se han presentado algunos eventos al interior del país que liberan energía no por interacción entre las placas tectónicas como ocurre en los sismos de subducción sino asociados a un mecanismo de falla normal. Estos, en algunas ocasiones, han provocado no solamente daños estructurales y económicos, sino también la pérdida de vidas humanas; ejemplo de ello son los sismos de Orizaba, Veracruz ($M_w=7.0$) en 1973, el de Huajuapán de León ($M_w=7.0$) en 1980 y más recientemente los del 23 de mayo de 1994 ($M_w=6.5$), 15 de junio de 1999 ($M_w=7.0$) también en el mismo municipio de Huajuapán de León, 30 de septiembre de 1999 ($M_w=7.5$) en Oaxaca y 21 de julio de 2000 ($M_w=5.9$) en Puebla.

Existen evidencias históricas y avances recientes que muestran las diferencias entre los sismos de tipo subducción y profundidad intermedia. Estudios detallados de la fuente indican que el tipo de falla, caída de esfuerzos y magnitud provoca que los sismos de falla normal sean más energéticos que los sismos de subducción. Además, la propagación de las ondas de los sismos de subducción difiere de los sismos de falla normal (Furumura y Singh, 2002), donde la atenuación de los sismos de falla normal es mayor que la de los eventos de subducción (Singh, 2003). Como resultado de estas diferencias, el movimiento en la ciudad de México es muy distinto ante ambos eventos, reflejándose ésto no sólo en el contenido de frecuencias donde los sismos de falla normal presentan un mayor contenido de alta frecuencia con respecto a los de subducción, sino también en la duración ya que los sismos de subducción son más largos que los sismos de falla normal. Ante estas diferencias se puede esperar que los efectos que provocan los movimientos de subducción y falla normal en las estructuras sean diferentes.

1.2 Leyes de atenuación para sismos de subducción y falla normal en la Ciudad de México

Existen diferentes maneras de estimar espectros de respuesta dada una magnitud y distancia en sitios instrumentados y no instrumentados. En el capítulo 2 y apéndice II de este trabajo se presenta un estudio detallado de algunos métodos para obtener leyes de atenuación espectral y sus incertidumbres

para estimar la aceleración espectral. A continuación, se presentan coeficientes obtenidos de tal forma que tales coeficientes presenten las menores incertidumbres (Método 1), debido a que se incluyen efectos de sitio de forma directa, usando datos observados. Consiste en el uso de una regresión lineal bayesiana (Reyes, 1999) usando la siguiente forma funcional:

$$(1.1)$$

Donde a es la aceleración espectral en el sitio, T es el periodo de un sistema de un grado de libertad, R es la distancia más corta al área de ruptura, α y β son los coeficientes a ser estimados, M_w es la magnitud, M_{ref} es la magnitud de referencia (en este trabajo se consideró $M_{ref} = 6.0$ y 5.0 para sismos de subducción y falla normal, respectivamente) y σ es el error estimado aleatorio, asumido para ser normalmente distribuido.

1.2.1 Ley de atenuación para sismos de subducción

En el apéndice II (Tabla 1) se muestran las características de los sismos de tipo subducción usados y los datos disponibles en las tres estaciones en la Ciudad: Ciudad Universitaria (CU), Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) y Central de Abastos (CD). Así mismo, en el apéndice II se presenta una descripción detallada de la obtención de los coeficientes. En la Tabla 1.1 se muestra los coeficientes obtenidos para los registros del apéndice II (sitio CU, SCT y CD), los cuales fueron obtenidos con más datos y, por lo tanto, son más confiables que aquellas obtenidas publicadas en previos trabajos. La Figura 1.1 ilustra la predicción de un espectro hipotético para una magnitud de $M_w=8.2$ y una distancia de $R=278$ km, así como el sismo registrado durante el evento del 19 de Septiembre de 1985, usando recientes expresiones en los sitios estudiados. Se puede observar que el espectro de respuesta hipotético muestra mayores intensidades espectrales que el observado del sismo del 19 de Septiembre de 1985. Por lo tanto, como es bien sabido, mayores intensidades que el sismo de 1985 podrían presentarse en la Ciudad de México.

1.2.2 Ley de atenuación para sismos de falla normal

Para sismos de falla normal se usaron más de 10 sismos de falla normal registrados en cada uno de los sitios estudiados. En la Tabla 1.2 se muestran las características de los sismos usados y datos disponibles para las tres estaciones antes mencionadas. En la Tabla 1.3 se presentan los coeficientes obtenidos para los registros de la Tabla 1.2, los cuales fueron obtenidos con el Método 1 de regresión bayesiana presentado en apéndice II. La Figura 1.2 ilustra la predicción del espectro de respuesta (amortiguamiento crítico del 5%) para una magnitud de $M_w=7.0$ y una distancia epicentral de $R=137$ km; también se señala el espectro de respuesta para el sismo del 21 de Julio de 2000 ocurrido en Copalillo Puebla. Se observa mayores intensidades espectrales en el escenario de un sismo de falla normal, principalmente en periodo corto ($T<1$ seg) para terreno firme, con respecto al escenario presentado de tipo subducción. Por lo tanto ambos tipos de eventos deben ser considerados cuando se utilicen acelerogramas con propósitos de diseño.

1.3 Diferencias observadas en edificios instrumentados ante sismos de subducción y falla normal

En un estudio previo (Jaimes y Reinoso, 2006a) se detectaron diferencias en los espectros de respuesta elástica e inelástica, energía de entrada y energía de histéresis ante los eventos de subducción y falla normal. Por ello se estudiaron algunos edificios instrumentados que tuvieron registrados en sus diferentes niveles eventos ocurridos en México entre los años de 1994 y 2000 debido a sismos de

subducción y falla normal. Las respuestas observadas se comparan con las calculadas por medio un método simplificado (Miranda y Taghavi, 2005) con la finalidad de observar la respuesta en otros niveles de los edificios donde no se tiene instrumento debido a que en algunos casos sólo se cuenta con registros en la azotea y se desconoce cómo se comporta en pisos intermedios. Para ello se determinan los parámetros requeridos por el modelo como es el periodo de la estructura, T , amortiguamiento, ζ , y el parámetro α . El apéndice I (Tabla 1) contiene datos de los eventos y parámetros utilizados al emplear el método simplificado. Los parámetros se calculan para cada estructura y en cada dirección, es decir, que estos varían de evento a evento debido a que se ha observado que el periodo y amortiguamiento de algunas estructuras que han presentado comportamiento no lineal o han sido reestructuradas se han modificado en los últimos diez años. Los edificios son: PC y MJ en zona de lago y el edificio PI en terreno firme de la Ciudad de México.

1.3.1 Edificio PC

Es una estructura de 18 niveles formada originalmente por marcos de concreto reforzado en las dos direcciones; posteriormente la dirección transversal y longitudinal fueron reforzados con muros de concreto que se extienden desde la losa de sótano hasta la azotea (Pavón y Rodríguez, 1990). Se encuentra desplantado en terreno blando de la ciudad de México, en un sitio con un periodo fundamental de 2.2 segundos. El edificio presenta un periodo estructural promedio de 2.63 y 2.71 en la dirección longitudinal y transversal respectivamente. En la Tabla 1 del apéndice I se presentan los parámetros utilizados para obtener la respuesta mediante el método simplificado ante los dos eventos sísmicos estudiados.

En la Figura 1.3 se muestran las aceleraciones máximas observadas de cada piso normalizadas con respecto a la del suelo (PFA/PGA, puntos), y las calculadas con el método simplificado con respecto a su altura normalizada (h/H , línea continua), ante los sismos de subducción del 10 de diciembre de 1994 ($M_w=6.6$, $R=290$ km) y de falla normal del 21 de julio de 2000 ($M_w=6.3$, $R=140$ km). Se observa que a pesar de que las aceleraciones máximas del suelo son similares para ambos sismos (Tabla 1 del apéndice I), las amplificaciones, PFA/PGA, son mayores en los diferentes niveles para el evento de subducción (10/Dic/94) con respecto al de falla normal (21/Jul/00) por las razones expuestas en las figuras 1 y 2. El modelo simplificado permite tener una mejor apreciación de estas diferencias y de los efectos que tienen estos dos tipos de eventos en la estructura. Estas diferencias son debidas a que los sismos de falla normal para estructuras con periodo estructural mayor al periodo del suelo (en este caso el periodo promedio de la estructura tanto en dirección longitudinal, $T = 2.63s$, como en dirección transversal, $T \approx 2.71s$, resultan mayores al del periodo del suelo, $T_s \approx 2.2s$) provocan que los modos superiores tengan mayor participación en la respuesta del edificio.

Lo anterior también se aprecia en la Figura 1.4 en la que se presentan los espectros de respuesta en diferentes niveles instrumentados ($h/H=1.00$, 0.63 , 0.32) y no instrumentados ($h/H=0.75$ y 0.15) del edificio PC. Se observa cómo la respuesta observada es similar a la calculada con el método simplificado en los niveles instrumentados lo que valida el uso del método para extrapolar a pisos no instrumentados. Por otro lado se observa que ante el evento de falla normal (21/07/00) la participación de los modos superiores (segundo y tercer modo principalmente) son mayores inclusive que la del primer modo de la estructura (excepto en el nivel $h/H \approx 0.75$ donde se presenta un punto de inflexión de los modos superiores a este nivel) en comparación con el sismo de subducción (10/12/94) donde el primer modo es dominante en ambas direcciones del edificio. Por lo tanto la mayor participación de los modos superiores no sólo podría generar mayores distorsiones en pisos superiores sino además un mayor daño en los contenidos de los edificios debido a que son mayores las intensidades en los diferentes niveles en periodos menores con respecto al modo fundamental de la estructura o que, por

ejemplo, un contenido con periodo de 0.8s ubicado en cualquier piso (excepto nivel $h/H \approx 0.75$) sufra mayores demandas para un sismo de falla normal que para uno de subducción.

1.3.2 Edificio MJ

Está ubicado cerca de la estación del metro Juárez. Tiene 7 niveles. La estructura original estaba formada por marcos de concreto reforzado y posteriormente fue reforzada con encamisado de columnas con placas de acero y colocando contraventeos de acero en ambas direcciones y muros de concreto en la dirección longitudinal. El edificio está desplantado en terreno blando de la ciudad de México, en un sitio con un periodo fundamental de 2 segundos. En la Tabla 2 del apéndice 1 se indica los parámetros empleados al aplicar el método simplificado para reproducir adecuadamente la respuesta. La estructura tiene un periodo promedio de 0.65 y 0.68 en la dirección longitudinal y transversal, respectivamente, ante los dos eventos sísmicos analizados (ver Figura 1 del apéndice I) del 14 de septiembre de 1995 ($M_w=7.4$, $R=260$ km) de subducción y el del 15 de junio de 1999 ($M_w=6.5$, $R=230$ km) de falla normal. Estos dos eventos se consideraron en esta estructura porque se presentaron después de que el edificio fue reforzado en el año de 1992 con los muros de concreto.

En la Figura 1.5 se presentan al igual que en la Figura 1.3 pero para el edificio MJ, las aceleraciones observadas de cada piso normalizadas con respecto a la del suelo (PFA/PGA, puntos), y las calculadas con el método simplificado con respecto a su altura normalizada (h/H , línea continua). En esta figura se puede observar que la respuesta obtenida por medio del método simplificado (línea continua) con respecto al observado (puntos) considerando sólo tres parámetros está bien aproximada, y que gracias al método simplificado se tiene una buena idea del tipo de configuración que presentó la estructura ante los dos eventos. La relación PFA/PGA es mayor para el evento de falla normal a pesar que el sismo de subducción presenta una mayor aceleración del suelo ($PGA=0.32m/s^2$) que el de falla normal ($PGA=0.21m/s^2$); esto debido a que el contenido de alta frecuencia del sismo de falla normal provoca en este caso intensidades espectrales similares al sismo de subducción (ver Figura 5 del apéndice I). También se observa lo que anteriormente se había mencionado (Figura 4 del apéndice I) que cuando el periodo de la estructura es menor que el periodo del suelo, el modo que más participa en la estructura debido a sismos de subducción y falla normal es el primer modo. Es decir, como el edificio tiene un periodo de $T \approx 0.65s$ en la dirección longitudinal y un periodo de $T \approx 0.68s$ en la dirección transversal (ambos menores que el periodo del suelo, $T_s \approx 2s$) provoca que predomine el primer modo del edificio.

En la Figura 1.6 se presentan los espectros de respuesta de piso de la azotea, único piso instrumentado en el edificio; se muestra como la respuesta obtenida con el método analítico (línea gruesa) es casi idéntica a la respuesta observada (línea delgada) y como es el primer modo ($T \approx 0.65s$ y de $T \approx 0.68s$) el que tiene mayor participación para ambos tipos de eventos.

1.3.3 Edificio PI

Esta estructura está integrada por cuatro torres (I, II, III y IV) de marcos de concreto reforzado con una altura mayor de 60 m, unidas en los 6 niveles inferiores. Las torres I y II fueron construidas en 1982 mientras que las III y IV datan de 1992. El edificio se encuentra instrumentado en las torres I y IV. Está desplantado en terreno firme de la ciudad de México. Este edificio presenta un periodo estructural aproximado de 1.485 y 1.48 segundos en la torre IV y de 1.68 y 1.92 segundos en la torre I, en las direcciones longitudinal y transversal, respectivamente. Se analizó la torre IV porque se contaba con información sobre los dos tipos de sismos que se han manejado en el trabajo. La Tabla 2 del apéndice I presenta los parámetros utilizados para reproducir por medio del método simplificado esta estructura

ante los dos eventos analizados (Figura 1 del apéndice I): 9 de octubre de 1995 ($M_w=8.0$, $R=590$ km) de subducción y el del 23 de mayo de 1994 ($M_w=6.2$, $R=210$ km) de falla normal.

En la Figura 1.7 se presenta al igual que en las figuras 1.3 (edificio PC) y 1.5 (edificio MJ) los cocientes PFA/PGA con respecto a su altura normalizada (h/H) tanto los observados (puntos) como los calculados (línea continua) para el edificio PI. Las observaciones hechas para los edificios desplantados en terreno blando son también válidas en terreno firme. La estructura ante el evento de falla normal presenta mayor participación de los modos superiores con respecto al de subducción. La mayor participación de los modos superiores en el sismo de falla normal (23/may/94) puede provocar mayores movimientos laterales en niveles superiores con respecto al observado de subducción (09/oct/94) como se indica en la figura con una línea horizontal para ambas direcciones del edificio. Se observa cómo la amplificación en pisos superiores es mayor ante el sismo de falla normal con respecto al de subducción.

En la Figura 1.8 se presenta la respuesta tanto en niveles donde hay registro ($h/H \approx 1.00$ y 0.325) como en donde no lo hay ($h/H \approx 0.75$ y 0.15) del edificio PI (línea delgada, observada, y línea gruesa, calculada con el método simplificado). En esta figura se aprecia al igual que en el edificio PC cómo cuando la estructura tiene un periodo estructural mayor al periodo del suelo da como resultado que los modos superiores tengan mayor participación ante este tipo de eventos (excepto en el nivel $h/H \approx 0.75$ donde no hay contribución de modos superiores debido a que coincidentemente se presenta en esa altura un punto de inflexión). Esto implica, no sólo posibles daños en pisos superiores sino mayor daño en los contenidos del edificio.

1.4 Discusión

En este trabajo se presentan dos leyes de atenuación para CU, SCT y CD de la Ciudad de México ante sismos de tipo subducción y falla normal. La ley de atenuación obtenida para terreno firme puede ser utilizada para predecir espectros respuesta o leyes de atenuación en sitios instrumentados o no instrumentados de acuerdo a lo que se presentará en el capítulo 2 de este trabajo.

Además, se presentaron las diferencias en la respuesta sísmica de estructuras ubicadas en el valle de México ante dos tipos de eventos: subducción y falla normal. Resultados de este capítulo junto con los presentados en el apéndice I muestran diferencias importantes en periodos cortos ($T < 1.0s$) en los espectros de respuesta inelásticos, en la energía de entrada y en la energía histéresis normalizada de sistemas de 1GDL sobre todo en terreno firme, teniendo mayor intensidad los sismos de falla normal con respecto a los de subducción. Estos resultados indican que se pueden esperar mayores demandas inelásticas en las estructuras ante sismos de profundidad intermedia.

Se estudiaron eventos sísmicos registrados en edificios instrumentados tanto en terreno firme como en zona de lago de la ciudad de México. Se encuentra que los modos superiores pueden tener una gran influencia cuando los sismos son de falla normal. Estos modos superiores provocan una mayor intensidad en periodos cortos que podrían afectar a los contenidos en las estructuras y causar daños en pisos superiores.

Las amplificaciones en los pisos superiores con respecto al suelo varían entre 2 y 6 veces, siendo mayores las amplificaciones en estructuras con $T < 1s$ ante sismos de falla normal y para estructuras con $T > 1s$ debido a sismos de subducción. También, es importante considerar el tipo de estructuración del edificio: ante sismos de falla normal para estructuras con periodos mayores a un segundo las amplificaciones en la azotea son mayores para estructuras que se deforman como vigas a flexión

(estructuras con muros o contravientos) con respecto a estructuras que se deforman como vigas de cortante (marcos estructurales).

El riesgo sísmico de estructuras en sitios del valle de México está prácticamente dominado por los eventos de subducción, sin embargo, de acuerdo a lo mostrado en este trabajo se puede esperar que los sismos de falla normal causen daños en estructuras con periodos estructurales $T < 1.0s$ en terreno firme y en zona de lago en periodos alrededor del segundo modo fundamental del suelo. También se pueden esperar mayores distorsiones en pisos superiores y daños en contenidos de edificios en los diferentes niveles del edificio debido a este tipo de sismos. Para fines prácticos, es muy importante utilizar acelerogramas de diseño de ambas fuentes sísmicas en la evaluación de la respuesta estructural debido a que no sólo se debe contemplar el uso de grandes sismos de subducción sino también considerar los efectos que tienen los sismos de falla normal en la respuesta estructural.

Tabla 1.1. Valores de $\alpha_i(T)$ obtenidos para CU, SCT y CD (Componente EW) para sismos de subducción

T	CU				SCT				CD			
	α_1	α_2	α_3	α_4	α_1	α_2	α_3	α_4	α_1	α_2	α_3	α_4
0.001	5.6897	1.1178	-0.50	-0.0060	5.7962	1.6328	-0.50	-0.0044	6.1982	0.8933	-0.50	-0.0031
0.2	6.5911	0.8874	-0.50	-0.0067	6.0527	1.5841	-0.50	-0.0046	6.3205	0.8797	-0.50	-0.0032
0.4	6.3144	1.0139	-0.50	-0.0059	6.2063	1.5638	-0.50	-0.0046	6.8290	0.8348	-0.50	-0.0039
0.6	6.6483	1.1018	-0.50	-0.0065	6.6180	1.4293	-0.50	-0.0042	6.8249	0.7844	-0.50	-0.0036
0.8	6.8495	1.3343	-0.50	-0.0076	6.3107	1.6049	-0.50	-0.0044	7.4872	1.0401	-0.50	-0.0055
1	6.4316	1.3155	-0.50	-0.0064	6.2809	1.5633	-0.50	-0.0043	7.4524	0.7789	-0.50	-0.0038
1.2	6.7093	1.3152	-0.50	-0.0072	6.4015	1.4574	-0.50	-0.0034	8.5807	0.7605	-0.50	-0.0062
1.4	6.0035	1.2168	-0.50	-0.0050	6.7468	1.3862	-0.50	-0.0035	7.4860	1.1000	-0.50	-0.0054
1.6	6.0507	1.2437	-0.50	-0.0051	6.8058	1.5075	-0.50	-0.0033	6.3268	1.0398	-0.50	-0.0024
1.8	5.6822	1.3034	-0.50	-0.0046	7.1556	1.5831	-0.50	-0.0037	6.0009	1.0704	-0.50	-0.0019
2	5.7883	1.3993	-0.50	-0.0056	7.4992	1.7803	-0.50	-0.0052	5.6852	0.9924	-0.50	-0.0007
2.2	5.5195	1.6160	-0.50	-0.0058	7.5028	1.8101	-0.50	-0.0062	5.8853	0.9743	-0.50	-0.0006
2.4	5.1604	1.4749	-0.50	-0.0048	6.9067	1.9633	-0.50	-0.0058	5.7522	0.8490	-0.50	0.0006
2.6	5.4283	1.6010	-0.50	-0.0061	6.4540	2.1780	-0.50	-0.0058	6.1640	0.8390	-0.50	0.0003
2.8	5.0573	1.4965	-0.50	-0.0049	6.4178	2.1542	-0.50	-0.0063	6.5639	0.9007	-0.50	-0.0007
3	4.5972	1.4695	-0.50	-0.0039	6.2336	1.9706	-0.50	-0.0061	6.3475	0.9989	-0.50	-0.0004
3.2	4.4303	1.5104	-0.50	-0.0038	5.7517	1.9212	-0.50	-0.0052	5.9176	1.1187	-0.50	0.0004
3.4	4.0981	1.5027	-0.50	-0.0031	5.4499	1.9488	-0.50	-0.0051	5.8643	1.2408	-0.50	-0.0001
3.6	3.7992	1.6018	-0.50	-0.0029	5.1882	1.9458	-0.50	-0.0050	6.1972	1.3262	-0.50	-0.0018
3.8	3.5164	1.7014	-0.50	-0.0029	5.0502	1.9379	-0.50	-0.0050	6.3375	1.5119	-0.50	-0.0033
4	3.2601	1.7098	-0.50	-0.0024	5.0775	1.9604	-0.50	-0.0055	6.2694	1.6623	-0.50	-0.0041
4.2	3.0349	1.6404	-0.50	-0.0020	4.7667	1.9258	-0.50	-0.0048	6.1002	1.7283	-0.50	-0.0044
4.4	2.9353	1.6219	-0.50	-0.0019	4.4999	1.8246	-0.50	-0.0042	5.8153	1.6830	-0.50	-0.0042
4.6	2.7737	1.5579	-0.50	-0.0016	4.2413	1.7518	-0.50	-0.0036	5.5407	1.6086	-0.50	-0.0038
4.8	2.6416	1.5223	-0.50	-0.0015	3.8406	1.7391	-0.50	-0.0027	5.1473	1.5643	-0.50	-0.0031
5	2.6246	1.5194	-0.50	-0.0018	3.5085	1.7430	-0.50	-0.0020	4.8717	1.5613	-0.50	-0.0028
5.2	2.4099	1.4851	-0.50	-0.0014	3.2950	1.7586	-0.50	-0.0017	4.7096	1.5826	-0.50	-0.0028
5.4	2.1372	1.4635	-0.50	-0.0008	3.2182	1.7798	-0.50	-0.0018	4.6660	1.5648	-0.50	-0.0029
5.6	2.0505	1.5243	-0.50	-0.0010	3.1702	1.7939	-0.50	-0.0019	4.6605	1.5547	-0.50	-0.0032
5.8	2.2973	1.6494	-0.50	-0.0022	3.1198	1.8428	-0.50	-0.0021	4.6512	1.5431	-0.50	-0.0035
6	2.6207	1.7533	-0.50	-0.0035	3.0442	1.8875	-0.50	-0.0023	4.5998	1.5379	-0.50	-0.0036

Tabla 1.2. Sismos de falla normal con $M > 5$ registrados en tres estaciones de la Ciudad de México

ID	Fecha	Ubicación	M	Lat.	Long.	Prof.	Distancia-CU	CU	SCT	CD
1	06/0764	Prof. Int. Oeste	6.7	18.03	100.77	55	179	✓	X	X
2	05/08/93	Prof. Int. Centro	5.2	17.429	98.337	54	229	✓	✓	✓
3	23/02/94	Prof. Int. Centro	5.8	17.75	97.27	75	267	✓	✓	✓
4	06/05/94	Prof. Int. Centro	5.2	18.39	97.98	57	163	✓	✓	✓
5	23/05/94	Prof. Int. Centro	6.2	18.02	100.57	50	206	✓	✓	✓
6	10/12/94	Prof. Int. Centro	6.4	17.98	101.52	50	288	✓	✓	✓
7	11/01/97	Prof. Int. Oeste	7.1	18.37	101.82	35	374	✓	✓	✓
8	03/04/97	Prof. Int. Centro	5.2	18.51	98.1	52	145	✓	✓	✓
9	22/05/97	Prof. Int. Oeste	6.5	18.37	101.82	54	298	✓	✓	✓
10	20/04/98	Prof. Int. Oeste	5.9	18.35	101.19	60	238	✓	✓	✓
11	15/06/99	Prof. Int. Centro	7	18.13	97.54	61	218	✓	✓	✓
12	21/06/99	Prof. Int. Oeste	6.3	18.15	101.72	53	296	✓	✓	✓
13	30/09/99	Prof. Int. Centro	7.4	16.03	96.96	47	435	✓	✓	✓
14	21/07/00	Prof. Int. Centro	5.9	18.11	98.97	50	136	✓	✓	✓
15	19/11/03	Prof. Int. Oeste	5.2	17.91	99.03	48	161	✓	X	X

Tabla 1.3. Valores de $\alpha_i(T)$ obtenidos para CU, SCT y CD (Componente EW) para sismos de falla normal

T	CU				SCT				CD			
	α_1	α_2	α_3	α_4	α_1	α_2	α_3	α_4	α_1	α_2	α_3	α_4
0.001	3.9822	1.8601	-0.50	-0.0089	4.9982	1.8612	-0.50	-0.0080	4.9371	1.8813	-0.50	-0.0081
0.2	5.1588	1.6227	-0.50	-0.0085	5.4049	1.8267	-0.50	-0.0081	5.3039	1.8433	-0.50	-0.0082
0.4	4.5776	2.0833	-0.50	-0.0095	4.3914	2.1447	-0.50	-0.0077	4.4212	2.1416	-0.50	-0.0077
0.6	3.7908	2.0602	-0.50	-0.0068	4.3804	2.0476	-0.50	-0.0050	3.9102	2.0466	-0.50	-0.0050
0.8	3.4864	2.1218	-0.50	-0.0067	3.7668	2.1042	-0.50	-0.0050	3.9480	2.1076	-0.50	-0.0050
1	3.4093	2.2389	-0.50	-0.0070	3.4934	2.2007	-0.50	-0.0048	3.9738	2.1947	-0.50	-0.0048
1.2	3.1589	2.4178	-0.50	-0.0080	3.6953	2.4140	-0.50	-0.0063	3.9959	2.4016	-0.50	-0.0062
1.4	3.0486	2.3648	-0.50	-0.0078	3.9241	2.4839	-0.50	-0.0071	3.7027	2.4837	-0.50	-0.0071
1.6	2.7950	2.3827	-0.50	-0.0071	4.0056	2.4311	-0.50	-0.0054	3.1368	2.4429	-0.50	-0.0055
1.8	2.1942	2.4009	-0.50	-0.0056	3.6492	2.4058	-0.50	-0.0035	2.6363	2.4217	-0.50	-0.0036
2	1.8208	2.5639	-0.50	-0.0056	3.4973	2.5002	-0.50	-0.0034	2.4793	2.5187	-0.50	-0.0035
2.2	1.6384	2.7180	-0.50	-0.0064	3.2653	2.6673	-0.50	-0.0045	2.7045	2.6188	-0.50	-0.0042
2.4	1.4967	2.6567	-0.50	-0.0063	2.8766	2.6325	-0.50	-0.0044	2.7993	2.6509	-0.50	-0.0045
2.6	0.9514	2.5784	-0.50	-0.0044	2.2959	2.6076	-0.50	-0.0036	2.7887	2.6248	-0.50	-0.0037
2.8	0.5323	2.6590	-0.50	-0.0034	1.7905	2.6466	-0.50	-0.0025	2.7816	2.6652	-0.50	-0.0026
3	0.5314	2.7761	-0.50	-0.0042	1.5722	2.7058	-0.50	-0.0028	2.7514	2.7230	-0.50	-0.0029
3.2	0.4063	2.7482	-0.50	-0.0035	1.1904	2.6437	-0.50	-0.0016	2.3728	2.6585	-0.50	-0.0017
3.4	0.4169	2.8840	-0.50	-0.0045	1.0794	2.8260	-0.50	-0.0030	2.3845	2.8399	-0.50	-0.0031
3.6	0.1969	2.9463	-0.50	-0.0044	0.8802	2.9128	-0.50	-0.0034	2.2473	2.9253	-0.50	-0.0035
3.8	0.1602	2.8693	-0.50	-0.0045	0.9200	2.8754	-0.50	-0.0039	2.2074	2.8847	-0.50	-0.0040
4	0.2030	2.7468	-0.50	-0.0042	0.9709	2.8097	-0.50	-0.0041	2.1431	2.8189	-0.50	-0.0041
4.2	0.0900	2.7475	-0.50	-0.0040	0.8448	2.8343	-0.50	-0.0042	1.9906	2.8412	-0.50	-0.0042
4.4	-0.2158	2.6860	-0.50	-0.0030	0.6834	2.8185	-0.50	-0.0040	1.8005	2.8265	-0.50	-0.0041
4.6	-0.3938	2.6205	-0.50	-0.0023	0.5266	2.7678	-0.50	-0.0035	1.6071	2.7767	-0.50	-0.0036
4.8	-0.6096	2.6079	-0.50	-0.0019	0.2821	2.7350	-0.50	-0.0030	1.2942	2.7432	-0.50	-0.0030
5	-0.7365	2.6365	-0.50	-0.0018	-0.0011	2.7269	-0.50	-0.0022	0.9029	2.7368	-0.50	-0.0023
5.2	-0.6405	2.6421	-0.50	-0.0022	-0.0398	2.6988	-0.50	-0.0022	0.8174	2.7111	-0.50	-0.0023
5.4	-0.6274	2.6346	-0.50	-0.0024	-0.0873	2.6779	-0.50	-0.0022	0.7622	2.6946	-0.50	-0.0023
5.6	-0.7390	2.5778	-0.50	-0.0020	-0.1773	2.6247	-0.50	-0.0018	0.6315	2.6435	-0.50	-0.0019
5.8	-0.8068	2.5131	-0.50	-0.0016	-0.2854	2.5423	-0.50	-0.0013	0.5131	2.5624	-0.50	-0.0014
6	-0.9892	2.4788	-0.50	-0.0009	-0.4616	2.4794	-0.50	-0.0006	0.3350	2.5013	-0.50	-0.0007

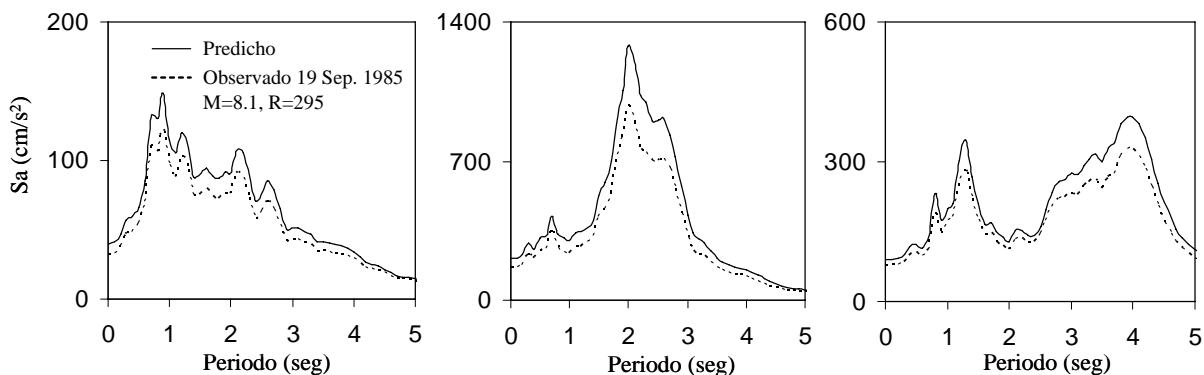


Figura 1.1 Comparación entre el espectro de respuesta de aceleración observado y calculado con la ley de atenuación de tipo subducción para una $M_w=8.2$ y $R=278$ km para a) CU, b) SCT y c) CD

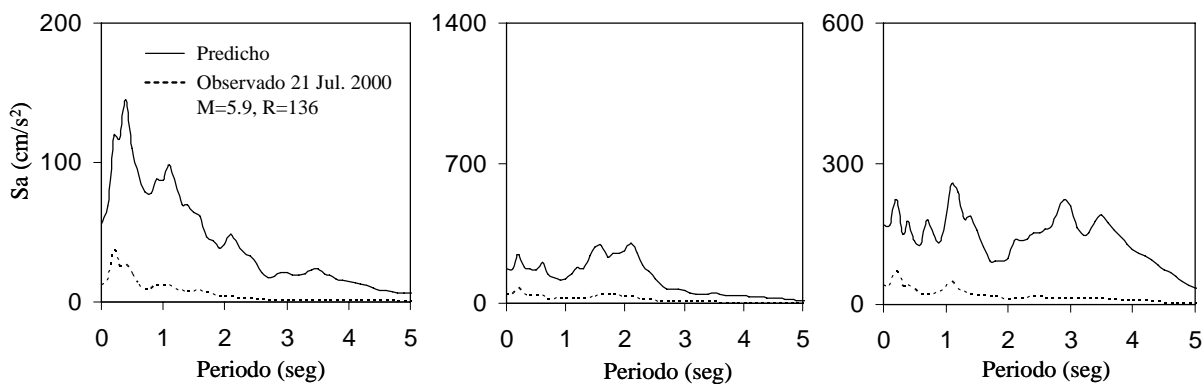


Figura 1.2 Comparación entre el espectro de respuesta de aceleración observado del evento del 21 de Julio de 2000 (línea discontinua) y calculado (línea continua) con la ley de atenuación de tipo falla normal para una $M_w=7.0$ y $R=137$ km para a) CU, b) SCT y c) CD

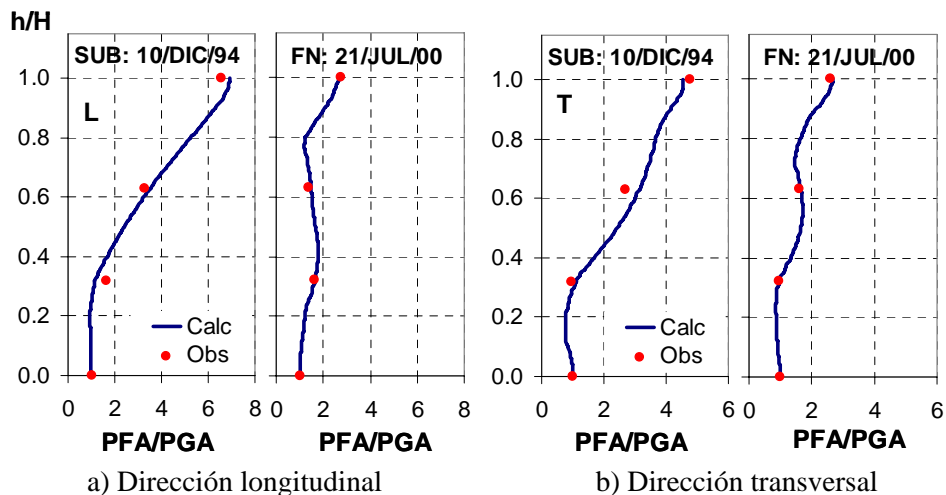


Figura 1.3. Aceleración máxima de piso normalizada con respecto a la del suelo (PFA/PGA) con respecto a la altura normalizada (h/H) ante un evento de subducción y de falla normal del edificio PC ubicado en zona de lago

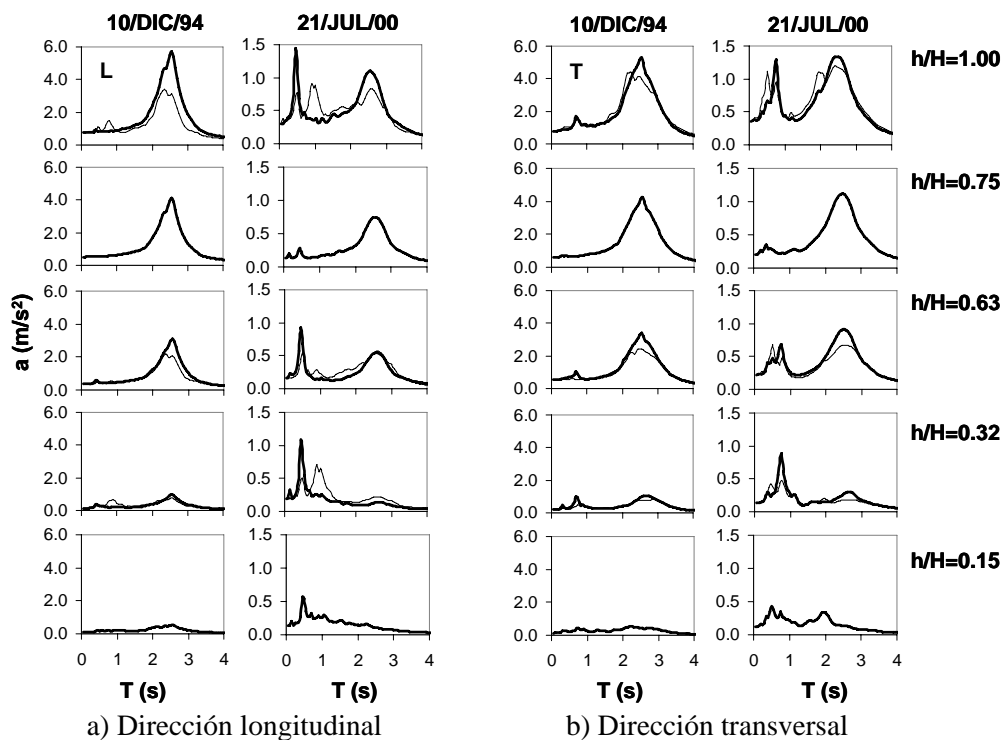


Figura 1.4. Respuesta en los diferentes niveles del edificio PC (línea delgada, observada y línea gruesa, calculada) ubicado en zona de lago ante los sismos del 10/Dic/94 y 21/Jul/00

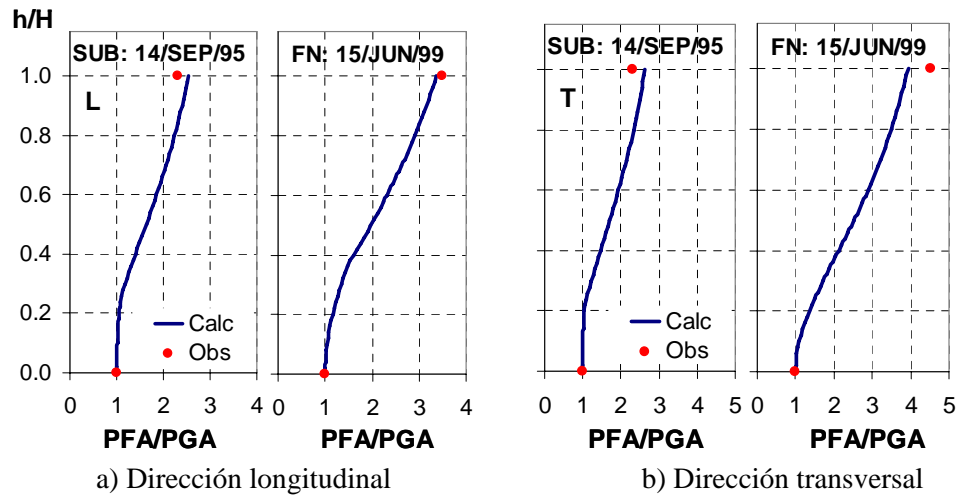


Figura 1.5. Aceleración máxima de piso normalizada con respecto a la del suelo (PFA/PGA) con respecto a la altura normalizada (h/H) ante un evento de subducción y de falla normal del edificio MJ ubicado en zona de lago

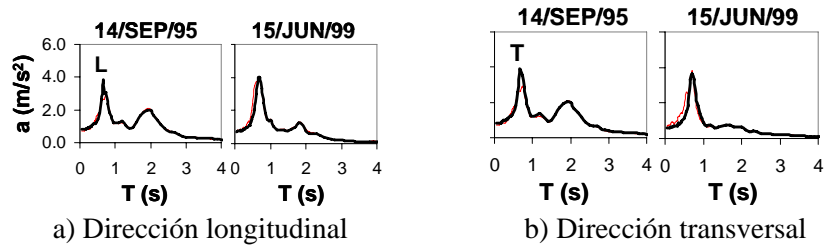


Figura 1.6. Respuesta en los diferentes niveles del edificio MJ (línea delgada, observada y línea gruesa, calculada) ubicado en zona de lago ante los sismos del 10/Dic/94 y 21/Jul/00

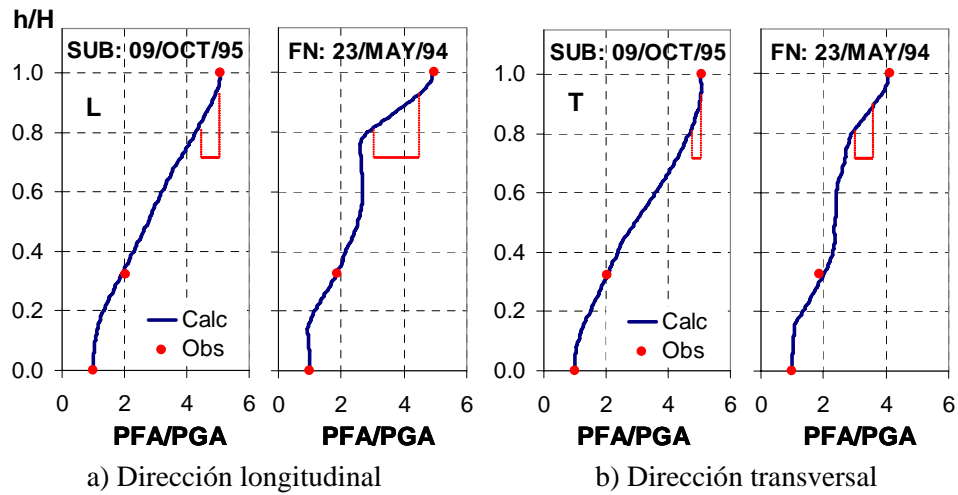


Figura 1.7. Aceleración máxima de piso normalizada con respecto a la del suelo (PFA/PGA) con respecto a la altura normalizada (h/H) ante un evento de subducción y de falla normal del edificio PI ubicado en zona de lago

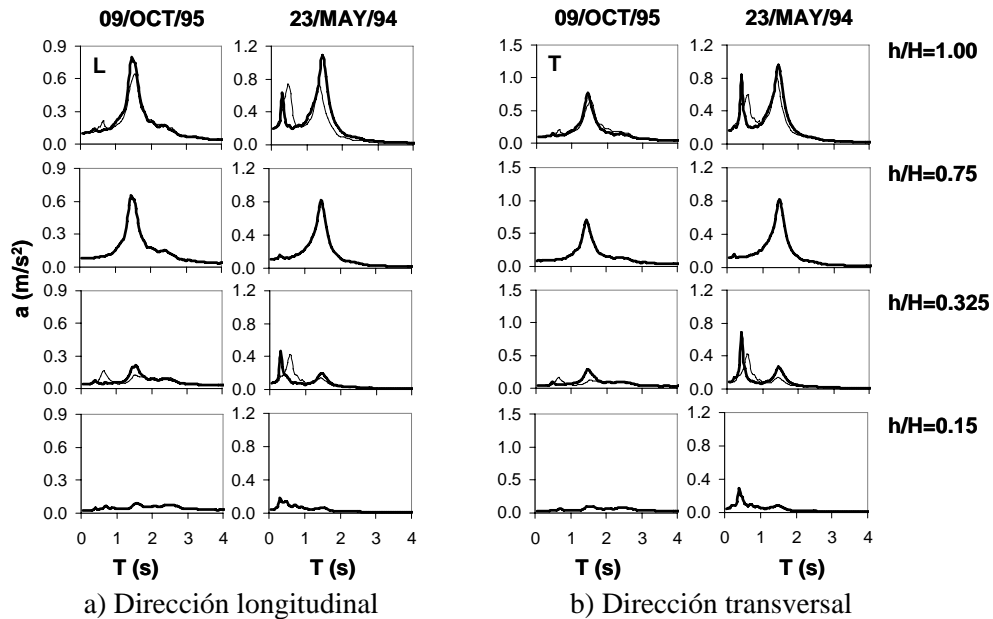


Figura 1.8. Respuesta en los diferentes niveles del edificio PI (línea delgada, observada y línea gruesa, calculada) ubicado en zona de lago ante los sismos del 10/Dic/94 y 21/Jul/00

Capítulo 2

Métodos para estimar espectros de respuesta

Estimar el movimiento del suelo sísmico es un importante paso en la anticipación de los efectos sísmicos en las estructuras y contenidos de las mismas. En este capítulo, primero se presentan cuatro métodos, todos basados en regresiones Bayesianas, para predecir espectros de respuesta en sitios instrumentados, localizadas en zona de lomas y de lago en la Ciudad de México, que ha registrado varios sismos recientes. Este trabajo ha sido publicado y se incluye en el apéndice II. Asimismo, se describe un método para obtener leyes de atenuación o espectros de respuesta para ser usado en sitios instrumentados y no instrumentados a través del uso de leyes de atenuación existentes espectrales de sitios en roca o terreno firme.

2.1 Importancia de predecir espectros de respuesta dada una magnitud y distancia

Para realizar un análisis probabilístico de peligro sísmico (*Probabilistic Seismic Hazard Analysis*, PSHA) en un sitio es necesario tener expresiones de atenuación las cuales relacionan, en términos probabilísticos, magnitud y distancia fuente-sitio con la medida de intensidad de interés, usualmente la aceleración máxima del suelo o aceleración espectral. Muchas de las relaciones de atenuación disponibles han sido construidos para sitios de terreno firme (*p.e.* Joyner y Boore, 1993; Sadigh, 1997; Abrahamson y Silva, 1997), varias relaciones de atenuación publicadas incluyen términos para ser usados en sitios generalmente definidos como “intermedio” o “suave”. Existen pocas leyes de atenuación para un sitio en particular (*p.e.* Atkinson, 2006), éstas han sido construidas usando registros de movimientos en ese sitio y que, en consecuencia, incluye los efectos de sitio particulares a éste estudiado (apéndice II).

Sin embargo, se está siendo común realizar PSHA para sitios específicos en los cuales los efectos de sitio pueden ser caracterizados de una manera más precisa que la clasificación genérica de “intermedio” y “suave”. En estos casos, la situación ideal es tener una sola relación de atenuación única para la estación la cual incluya correctamente los efectos de sitio apropiados. Escasas relaciones de este tipo están disponibles y, en general, los datos son insuficientes para construir una relación empírica.

2.2 Predicción de espectros de respuesta dada una magnitud y distancia en sitios instrumentados

Existen diferentes maneras para estimar el espectro de respuesta futuro en un sitio usando movimientos de suelo fuerte observados. A continuación, solo presentamos brevemente resultados de la aplicación de los cuatro métodos para predecir espectro de respuesta en la Ciudad de México en sitios instrumentados comparando sus incertidumbres. Los dos primeros métodos (Método 1 y 2) son aplicados a todas las estaciones mientras que los métodos 3 y 4 son solamente aplicados en los sitios de la zona del lago. En el apéndice II (Figura 1) se muestra un diagrama describiendo cada uno de estos métodos. Más detalles acerca de los métodos y resultados pueden ser vistos en el apéndice II y las referencias ahí contenidas.

2.2.1 Método 1: Regresión bayesiana del espectro de respuesta

El primero y uno de los más obvio (Método 1, ver apéndice II) es construir leyes de atenuación para estimar aceleraciones espectrales, esto implica el cálculo, a través de un método de regresión, de un conjunto de coeficientes para cada periodo estructural (*p.e.* Reyes, 1999; Joyner y Boore, 1993). En el apéndice II (Figuras 3 y 5) se presenta una comparación del espectro de repuesta observado (línea continua) con el espectro de respuesta estimado con la regresión bayesiana (línea discontinua) para el sitio CU en la primera y, SCT y CD en la segunda figura mencionada. En general, las estimaciones son aceptables. El error y la desviación estimada resultan muy bajos, como se señala en el apéndice II (Tabla 3). El Método 1 considera en forma directa los efectos de sitio (*p.e.* posibles efectos no lineales del suelo); éste es el que presenta menores incertidumbres.

2.2.2 Método 2: Regresión bayesiana del espectro de amplitudes de Fourier y uso de la teoría de vibraciones aleatorias

Una segunda manera (Método 2, ver apéndice II), es calcular relaciones de atenuación del espectro de amplitudes de Fourier para después estimar el espectro de respuesta usando teoría de vibraciones aleatorias, TVA (Cartwright and Longuett-Higgins, 1956; Reinoso *et al.*, 1992), un proceso que requiere también conocer la duración del movimiento fuerte. El Método 2 es similar al 1 y, quizás, lleva un poco más de tiempo. Pero, este ha sido útil para predecir espectro de respuesta en sitios con grandes efectos de sitio y poca o nula información acelerométrica, ha sido usado para obtener espectros de diseño para el código de la Ciudad de México, pérdidas esperadas que resultan útiles para el sector de seguros; este método fue usado debido a que el espectro de Fourier tiene restricciones teóricas. Es muy importante evaluar las incertidumbres de ambos métodos (Método 1 y 2) y decidir cual debe ser usado. En el apéndice II (Figuras 3 y 5) se muestran con línea delgada, resultados del Método 2 comparado con el espectro de respuesta observado (línea continua gruesa) y el espectro estimado con el Método 1 (línea discontinua). Se puede observar que las estimaciones son adecuadas y similares a las estimadas con el Método 1 para los sitios CU y SCT; sin embargo, para el sitio CD las diferencias entre los espectros del Método 2 y las observadas son mayores con respecto al Método 1. Esto podría deberse a efectos no lineales del suelo. Los cambios no lineales están muy claros en los espectros de respuesta, pero puede pasar inadvertido en los espectros de amplitudes de Fourier debido a la presencia de muchos picos o por el suavizado que se realiza al espectro de amplitudes de Fourier. Esto es por lo que el Método 1 es mejor que el Método 2 debido a que la regresión en el Método 1 captura directamente los efectos arriba mencionados. Otro factor, que podría influir en la predicción al usar el Método 2 en el sitio CD es el uso de TVA que considera un proceso estacionario.

2.2.3 Método 3: Regresión bayesiana del espectro de respuesta en CU y cociente espectral de respuesta

Para estaciones localizadas en sitios de zona de lago, en donde existe solo uno o muy pocos sismos, uno puede imaginar otros dos métodos para estimar espectros de respuesta futuros basados en estaciones de referencia (típicamente en sitios de terreno firme) que han registrado muchos sismos. Estos métodos necesitan al menos de un registro simultaneo en lo sitios de referencia y de lago para calcular la amplificación empírica. Siempre será incierto, sin embargo, si esta amplificación relativa permanecerá la misma para todos los movimientos de suelo fuerte estimados o no. Pero al menos para la Ciudad de México, se sabe bien que la arcilla se comporta casi linealmente para la mayoría de los sitios y que el comportamiento no lineal observado, si algo, es pequeño y puede ser tomado en cuenta por modelos simples (Reinoso y Ordaz, 1999). El primer método para lo sitios en zona lacustre (Método 3, ver apéndice II) requiere el calculo de relaciones espectrales de respuesta; aunque estas

relaciones no tienen ningún significado físico, ellos son dirigidos para representar la amplificación en el dominio del espectro de respuesta (Rosenblueth y Arciniega, 1992; Reyes, 1999). En el apéndice II (Figura 6) se muestra el espectro de respuesta obtenido con el Método 3 (línea continua delgada) junto con el espectro de respuesta observado (línea continua oscura) y el espectro obtenido con el Método 4 (línea discontinua). De nuevo, puede verse que en general las estimaciones para SCT (ver apéndice II, Figura 6a) son aceptables. Para la estación CD los resultados para los eventos 10 y 11 son muy malos. Esto es porque el promedio del cociente espiral de respuesta no puede tener en cuenta el efecto, explícitamente, del comportamiento no lineal referido en el apéndice II. Por lo tanto las incertidumbres tienen a ser ligeramente más grandes que los Métodos 1 y 2.

2.2.4 Método 4: Regresión bayesiana del EAF en CU, función de transferencia empírica y teoría de vibraciones aleatorias

El segundo método para sitios en zona de lago (Método 4, ver apéndice II) es obtener una función de transferencia empírica usando el espectro de amplitudes de Fourier en el sitio y en la estación de referencia (Singh *et al.*, 1988; Reinoso y Ordaz, 1999) y entonces, con el espectro de amplitudes de Fourier en la estación de referencia, el uso de teoría de vibraciones aleatorias y la duración del movimiento fuerte, se determina el espectro de respuesta. Resultados de este método son presentados en el apéndice II (Figura 6) con línea discontinua. Se puede observar que muchas de las predicciones son similares a las del Método 3 pero para el evento del 19 de Septiembre de 1985 permite mejores resultados.

2.3 Predicción de espectros de respuesta en sitios no instrumentados

Para cualquier evaluación práctica del peligro sísmico en términos de espectros de respuesta uno tiene que calcularlo para un sitio no instrumentado, y la interpolación viene a discusión, sobre todo en un lugar como la Ciudad de México con una zona de lago que cambia sus características de respuesta dentro de unas docenas de metros. Éste es el caso del código sísmico o el cálculo de mapas de riesgo o peligro, o cualquier estudio individual de espectros de respuesta de sitio específicos. De los resultados presentados previamente está claro que usando el Método 3 para todos los sitios instrumentados e interpolando estos espectros, es la mejor manera de obtener los espectros de respuesta en el sitio deseado.

Sin embargo, existe un método alternativo interesante planteado por Pérez *et al.* (2007) para obtener espectros de respuesta o relaciones de atenuación de respuesta en suelo de “transición” o “blando”. Estos autores plantean un método general y sencillo basado en la conocida teoría de vibraciones aleatorias, para calcular las relaciones de atenuación de respuesta en suelo de “transición” o “blando” basados en relaciones existentes de atenuación espectral de respuesta en roca o terreno firme. El método consiste en los siguientes pasos:

- 1) Calcular, para una magnitud y distancia, el espectro de respuesta esperado de una relación de atenuación existente para terreno firme o en roca.
- 2) De este espectro de respuesta y una estimación de la duración del movimiento fuerte, calcular, el espectro de amplitudes de Fourier (EAF) esperado asociado con el correspondiente espectro de respuesta en roca para la misma magnitud y distancia.
- 3) Incluir los efectos de sitio multiplicando el EAF obtenido en el paso 2 por la función de transferencia dependiente de la frecuencia (y posiblemente de la amplitud) de los depósitos del suelo.

- 4) Finalmente, con el EAF calculado en el paso 3 y una estimación de la duración de la fase intensa del movimiento, se calcula el espectro de respuesta en el sitio de “transición “ o “blando”, el cual será visto como el valor esperado para la magnitud y distancia usada.

Para mayores detalles del método mencionado ver el trabajo de Pérez *et al.* (2007).

2.4 Discusión

Se presentaron cuatro métodos diferentes para obtener espectros de respuesta futuros dados la magnitud y la distancia al área de ruptura basados en datos acelerométricos. Estos métodos se han usado en muchas aplicaciones incluso en el cálculo de los espectros de diseño incluido en el código y en muchos estudios que consideran riesgo sísmico en varios sitios. Todos los métodos tienen ventajas y desventajas, y entender y calcular sus errores y las incertidumbres es muy importante para el uso futuro de ellos.

De los resultados presentados aquí, el Método 1, la regresión de Bayesiana directa de espectros de respuesta, es la mejor opción puesto que mostró los más pequeños errores y desviaciones. El problema con el Método 1 es que necesita un conjunto amplio de registros (espectros de respuesta) para ser confiable, y éste no es el caso para la mayoría de los sitios. Realmente, es sólo cierto para los sitios presentados en este trabajo (CU, SCT y CD); para cualquier otro sitio el Método 1 no puede aplicarse.

El Método 2 es basado en los espectros de amplitudes de Fourier y el uso de la teoría de vibración aleatoria junto con la duración del movimiento fuerte, un paso que introduce aproximaciones que pueden reducir su confiabilidad. Las desviaciones estándar calculadas para este método son normalmente las más grandes.

Para la zona de lago, la falta de datos para la mayoría de los lugares hace que los Métodos 1 y 2 sean casi inútiles. Esto es por lo que los Métodos 3 y 4, que dependen de los datos observados en la estación de referencia (CU), son empleados. El Método 3 que está basado en los espectros de respuesta en CU y el uso de cocientes espectrales de respuesta es mejor que el Método 4 donde el uso de la teoría de vibraciones aleatorias y la duración del movimiento de suelo fuerte introducen incertidumbres y errores. Por supuesto, esto es considerando que el comportamiento no lineal no ocurre en el suelo de la Ciudad de México que todavía será confirmado por registros futuros.

Para cualquier evaluación práctica del peligro sísmico en términos de espectros de respuesta uno tiene que calcularlo para un sitio no instrumentado, y la interpolación es discutible, especialmente en un lugar como la Ciudad de México. Éste es el caso del código sísmico o el cálculo de mapas de peligro o riesgo, o cualquier estudio individual del espectro de respuesta del sitio específico. De los resultados presentados en este trabajo está claro que usando el Método 3 para todos los sitios instrumentados e interpolando estos espectros es la mejor manera de obtener los espectros de respuesta en el sitio deseado.

Sin embargo, se presenta un método alternativo para la obtención de espectros de respuesta dada una magnitud y distancia (implícito leyes de atenuación) en sitios no instrumentados. Para ello, es necesario contar, solamente, con una ley de atenuación del espectro de respuesta en roca (sitio de referencia) y conocer las propiedades geotécnicas del sitio. Por lo que resultará atractivo, en la práctica, para muchos sitios en donde no se cuenta con registros y se desea realizar PSHA.

Capítulo 3

Funciones de Green empíricas modificadas por atenuación para sitios distantes de la fuente sísmica

En este capítulo se presenta un esquema para modificar la función de Green empírica por atenuación considerando: (1) atenuación geométrica, (2) decaimiento de alta frecuencia, (3) atenuación regional y (4) fase de la señal. Los acelerogramas calculados con el método de simulación propuesto son comparados, en el dominio del tiempo y frecuencia, con movimientos sísmicos de tipo subducción y profundidad intermedia registrados en México. Se muestra como la técnica de función de Green empírica junta con una expresión propuesta puede simular la forma y amplitud del espectro de respuesta y de amplitudes de Fourier a distancias intermedias y lejanas de la fuente sísmica. Este trabajo ha sido publicado y se incluye en el apéndice III.

3.1 Importancia de la técnica de simulación de funciones de Green empíricas

Muchos problemas de diseño sísmico, tales como el diseño de estructuras importantes, requiere el uso de acelerogramas. Una posible manera de obtener movimientos de suelo debido a los eventos sísmicos grandes futuros esperados es el uso de la técnica de las funciones de Green empírica. La idea básica es usar registros de eventos de magnitud pequeña como aproximaciones de las funciones Green, y convolucionar estos adecuadamente usando leyes de escalamiento sísmico, para simular movimientos sísmicos que correspondan a los eventos de magnitud grande (Hartzell, 1978). De esta manera, es posible tener en cuenta condiciones locales en el sitio registrado, así como los efectos de propagación entre la fuente y el receptor. Se han propuesto esquemas diferentes de esta técnica para simular el proceso de ruptura de un sismo (Irikura, 1983; Joyner y Boore, 1986; Boatwright, 1988; Wennerberg, 1990; Kanamori *et al.*, 1993; Zeng *et al.*, 1994; Tumarking *et al.*, 1994; Hutchings, 1994a; Ordaz *et al.*, 1995). La técnica de las funciones Green no tiene en cuenta efectos de sitio no lineales, pero es posible incorporarlos con análisis no lineales geotécnicos (Heuze *et al.*, 1997; Nozu y Morikawa, 2004). La técnica también ha sido validada para calcular historias de movimientos de suelo de sismos importantes como son San Fernando (Hutchings, 1994b), Loma Prieta (Hutchings, 1991; Jarpe y Kasameyer, 1996) y Northridge (Hartzell *et al.*, 1999, 2005), y para la predicción de eventos futuros (Hutchings *et al.*, 1996).

Sin embargo, el método basado en funciones de Green empíricas presenta una limitación importante: no es aplicable a casos con distancias diferente de la fuente al sitio de aquéllos para los que la función de Green está disponible. Ésta es una limitación fuerte para la mayoría de los propósitos prácticos, ya que a menudo, un sismo registrado en el sitio, para la distancia deseada y de la magnitud apropiada, no esta disponible. Éste es el caso, por ejemplo, cuando se requiere que las historias de tiempo de aceleración a ser usadas en un diseño sísmico sean consistentes con un escenario sísmico definido, por ejemplo, en términos del máximo sismo creíble localizado a una distancia dada. En trabajos anteriores (*p.e.* Kamae *et al.* 1998) se propone una técnica híbrida para simular movimientos sísmicos de fuente cercana, los cuáles combinan métodos determinísticos y estocásticos para generar funciones de Green simuladas, en regiones en donde la ausencia de eventos de magnitud pequeña impiden aplicar la técnica de funciones de Green. Sin embargo, es tambien de gran interés obtener acelerogramas en sitios localizados a varios cientos de kilometros de la fuente sísmica. Para sitios cercanos a la fuentes son

necesarios más parámetros para representar la fuente (Bour y Cara, 1997) y para sitios lejanos de la fuente tales efectos podrían considerarse insignificantes o nulos para propósitos prácticos. Por lo tanto, se muestra que es posible utilizar una función de Green empírica con cierta magnitud y distancia, para simular un evento de mayor magnitud y distancia diferente a la registrada, pero localizada en la misma región. Mayores detalles se presentan en el apéndice III.

3.2 Descripción del método de funciones de Green empíricas modificadas por atenuación

Un sismo de magnitud pequeña registrada en el sitio de interés será visto como una función de Green empírica. Este registro debe presentar características similares a las de un gran sismo y ser representativo de la fuente sísmica y del mecanismo de falla de interés (*p.e.* mecanismo de falla inversa o de falla normal). Tal función de Green es modificada por efectos de atenuación mediante la ec. 3 (Apéndice III) a la distancia del evento objetivo usando parámetros sismológicos; con esta nueva historia de tiempo y la técnica de funciones de Green (para el trabajo se usa el método de Ordaz *et al.* 1995), se obtienen movimientos de suelo correspondientes al evento objetivo. Una descripción más detallada acerca de la ec. 3 mencionada para modificar la función de Green por efectos de atenuación puede ser vista en el apéndice III.

3.3 Ejemplos

A continuación se presentan tres ejemplos para probar el esquema descrito anteriormente. En el apéndice III (Tabla 1) se señalan los parámetros de los sismos usados en este capítulo. En el apéndice III (Tabla 2) se muestran las estaciones usadas y los datos disponibles de movimientos sísmicos fuertes. Como es mostrado en el apéndice III (Tabla 2), las estaciones seleccionadas cubren un amplio rango de distancia al área de ruptura ($28 < R < 320$ km), incluyen estaciones fuera y dentro de la Ciudad de México. La localización de estaciones, epicentros y área de ruptura de eventos indicados el apéndice 3 (Tabla 2) se señalan en la Figura 3 de este apéndice.

3.3.1 Sismo del 19 de Septiembre de 1985

Se usan registros de movimientos de suelo fuerte (componente EW) producidos por el sismo del 19 de septiembre de 1985 ($M=8.1$) como evento objetivo y los registros del sismo del 21 de septiembre de 1985 ($M=7.6$) como función de Green empírica. Tales funciones de Green son modificadas por atenuación a la distancia del evento objetivo (ver ec. 3 y Tabla 2 del apéndice III) usando parámetros mostrados en la Tabla 1 del apéndice 3; con estas nuevas historias de tiempo y la técnica de funciones de Green (Ordaz *et al.* 1995), se obtienen movimientos de suelo fuerte correspondientes al evento objetivo. El momento sísmico para el evento objetivo es $M_{0S}=1.05 \times 10^{28}$ dina-cm y la caída de esfuerzo es $\Delta\sigma_S=150$ bar (ver Tabla 1 del Apéndice III). El momento sísmico reportado para la función de Green empírica es $M_{0R}=1.05 \times 10^{28}$ dina-cm y la caída de esfuerzo es $\Delta\sigma_R=75$ bar (Tabla 1 del apéndice III). La Figura 3.1 muestra datos y simulaciones, incluyendo historias de tiempo de aceleración, así como también los espectros de Fourier y de respuesta observados y calculados. Los resultados corresponden a todas las estaciones acelerométricas disponibles que registraron tanto el evento objetivo como el evento usado como función de Green. Se puede observar que las historias de tiempo simuladas tienen una razonable aproximación con los registros observados para distancias intermedias y lejanas; sin embargo, para estaciones cercanas a la fuente sísmica, efectos de directividad son muy importantes por lo que los resultados no son aceptables (*p.e.* Estación AZIH Fig. 3.1a). Esto podría ser debido a que los efectos de directividad causan variaciones espaciales en el movimiento del suelo alrededor de la falla (Somerville *et al.* 1997) los cuales son difíciles de predecir. La Figura 3.1 también compara los espectros de respuesta observados (líneas continuas) para el evento del 19 de

Septiembre con el correspondiente espectro de respuesta esperado (líneas discontinuas) para las simulaciones. El último ha sido calculado promediando el espectro de varias simulaciones. Aunque estos espectros difieren para cada simulación, el espectro esperado es solamente consecuencia del escalamiento ω^2 y atenuación asumida. Nuevamente, se puede ser observado en al Figura 3.1 que los espectros de respuesta estimados para el evento objetivo son buenos, excepto para la estación AZIH, donde las ordenadas espectrales son sobreestimadas.

3.3.2 Sismo del 14 de Septiembre de 1995

Se usan movimientos del suelo registrado del sismo del 24 de Octubre de 1993 ($M=6.7$, $M_{OR}=1.20 \times 10^{26}$ dina-cm y $\Delta\sigma_R=10$ bar; ver Tabla 1 del apéndice III) como funciones de Green empíricas y los registros del sismo del 14 de septiembre de 1995 como evento objetivo. Este sismo fue registrado en varias estaciones (Tabla 2 y Fig. 3 del apéndice III). El momento sísmico del evento objetivo es $M_{OS}=1.11 \times 10^{27}$ dina-cm. La caída de esfuerzo $\Delta\sigma_S=16$ bar fue encontrada trazando la relación espectral promedio del evento objetivo entre el evento usado como función de Green empírica para todas las estaciones, fijándolo a la relación espectral predicha por un modelo ω^2 (Ordaz *et al.* 1995). La Figura 3.2 muestra la comparación para todas las estaciones de los datos observados y calculados, incluyendo historias de tiempo de aceleración y los espectros de Fourier y de respuesta. Se observa que aparte de la estación cercana a la fuente sísmica, COPL (Figura 3.2a), las historias de tiempo simuladas, espectros de Fourier y de respuesta son bastante bien aproximadas con los registros observados.

3.3.3 Sismo del 23 de Mayo de 1994

Existen evidencias que las características de fuentes y propagación de la onda de eventos de profundidad intermedia son diferentes a la de los eventos de subducción (*p.e.* Furumura y Singh, 2002; García *et al.* 2004). Por lo tanto es importante probar que el método propuesto es aplicable a ambos tipos de eventos. Se considera como evento objetivo al sismo del 23 de Mayo de 1994 con M 6.2 ($M_{OS}=2.77 \times 10^{25}$ dina-cm y $\Delta\sigma_S=324$ bars, ver Tabla 1 del apéndice III), el evento se selecciono debido a que fue registrado en muchas estaciones (ver Tabla 2 y Fig. 3 del apéndice III). Se usan registros de movimientos de suelo del sismo del 20 Abril de 1998 con M 5.9 ($M_{OS}=1.01 \times 10^{25}$ dina-cm y $\Delta\sigma_R=206$ bars, ver Tabla 1 del apéndice III) como funciones de Green empíricas. La Figura 3.3 muestra historias de tiempo de aceleración, así como también los espectros de Fourier y de respuesta observados y simulados. Los resultados corresponden a todas las estaciones usadas en las cuales se registraron ambos eventos. Pocas diferencias en las trazas observadas y simuladas pueden ser notadas. Es claro que el método es confiable y que el evento del 20 de Abril trabaja como una excelente función de Green para el evento del 23 de Mayo de 1994.

3.4 Discusión

Se presentó una expresión para modificar la función de Green empírica por efectos de atenuación considerando: (1) atenuación geométrica, (2) decaimiento de alta frecuencia, (3) atenuación regional y (4) fase de la señal. Las intensidades calculadas con el método de simulación son comparadas con sismos de subducción (mecanismo de falla inversa) y de profundidad intermedia (mecanismo de falla normal). El método muestra una buena aproximación entre los movimientos observados y simulados para estaciones localizadas a distancias intermedias y lejanas de la fuente sísmica; sin embargo, para estaciones cercanas a la fuente el método pierde precisión debido a patrones de radiación y heterogeneidad de la fuente, para estos casos, otras alternativas deben ser usadas.

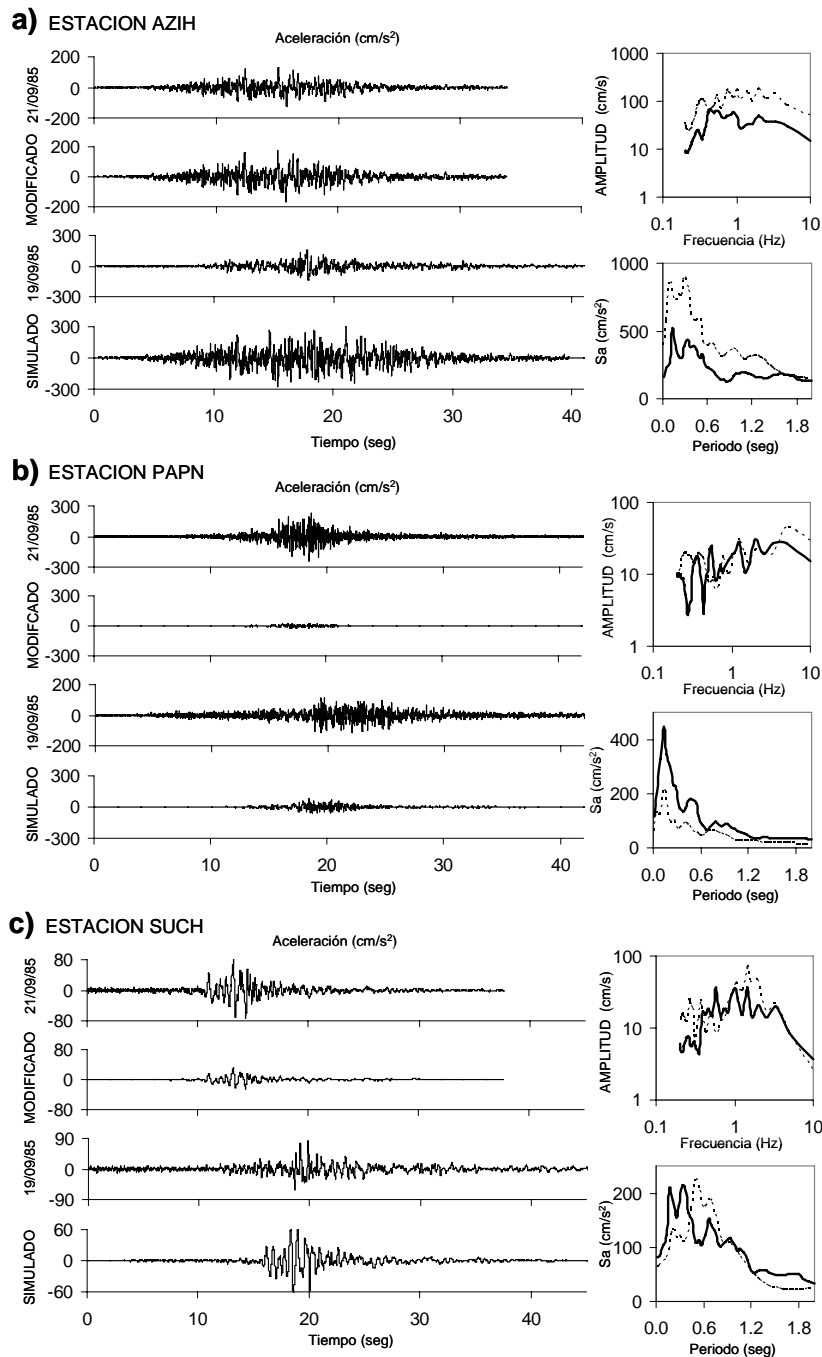


Figura 3.1. Historias de aceleración para estaciones (a) AZIH, (b) PAPN y (c) SUCH, del evento del 21 de Septiembre usado como función de Green (superior), el evento del 21 de Septiembre de 1985 modificado por atenuación (mitad-superior), el evento del 19 de Septiembre de 1985 tomado como el evento objetivo (mitad-inferior) y evento simulado (inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del esperado con el Método 5 (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-aceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y esperado

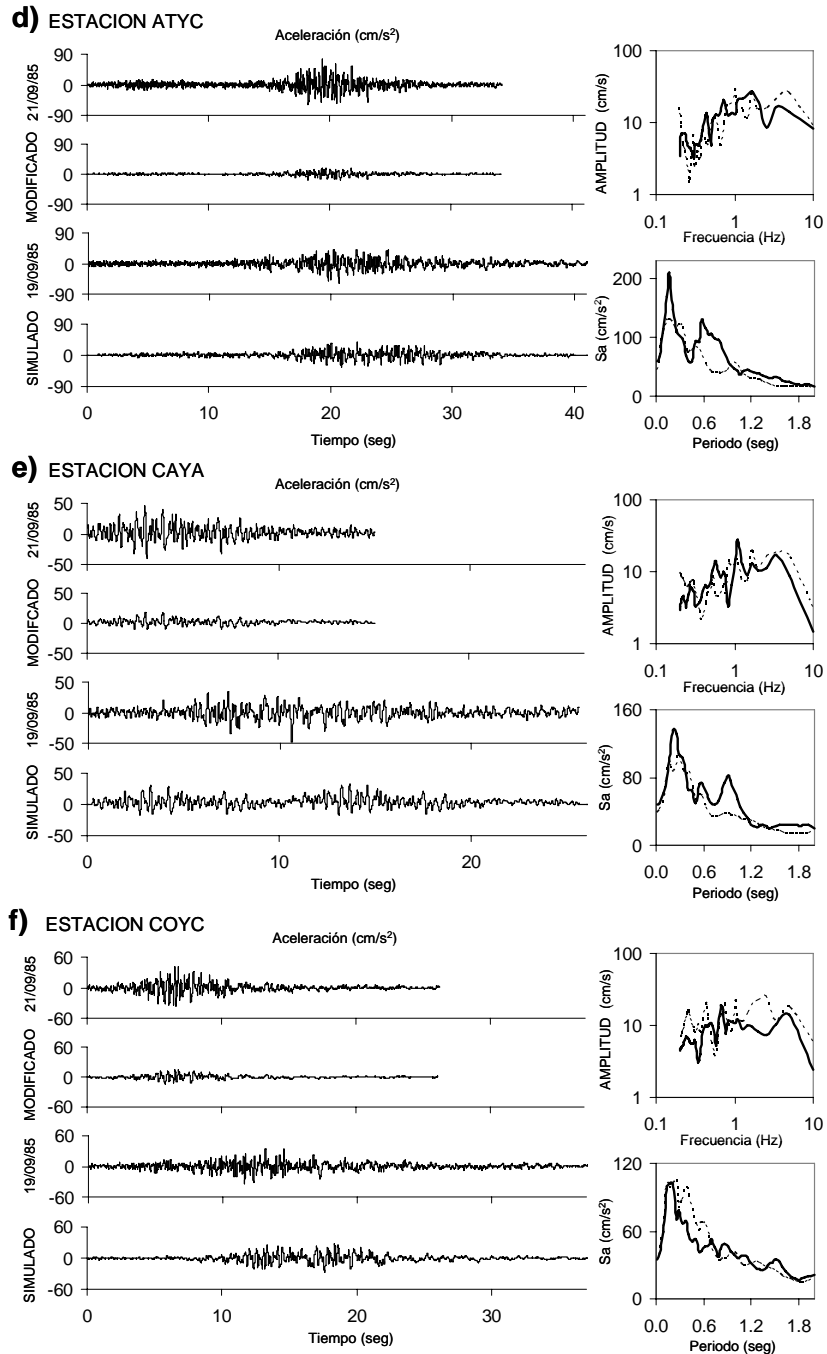


Figura 3.1 (continuación). Historias de aceleración para estaciones (d) ATYC, (e) CAYA y (f) COYC, del evento del 21 de Septiembre usado como función de Green (superior), el evento del 21 de Septiembre de 1985 modificado por atenuación (mitad-superior), el evento del 19 de Septiembre de 1985 tomado como el evento objetivo (mitad-inferior) y evento simulado (inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del esperado con el Método 5 (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-aceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y esperado

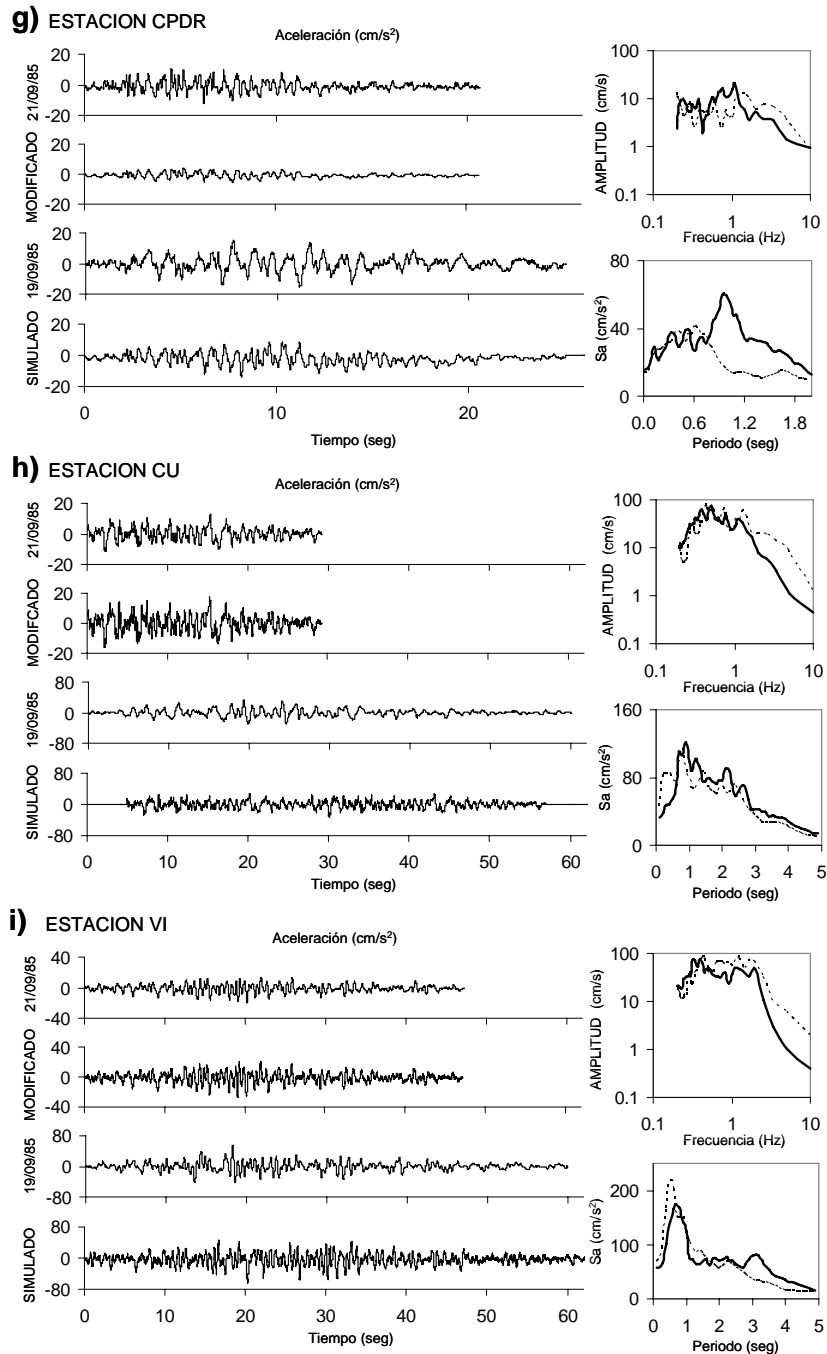


Figura 3.1 (continuación). Historias de aceleración para estaciones (a) CPDR, (b) CU y (c) VI, del evento del 21 de Septiembre usado como función de Green (superior), el evento del 21 de Septiembre de 1985 modificado por atenuación (mitad-superior), el evento del 19 de Septiembre de 1985 tomado como el evento objetivo (mitad-inferior) y evento simulado inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del esperado con el Método 5 (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-aceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y esperado

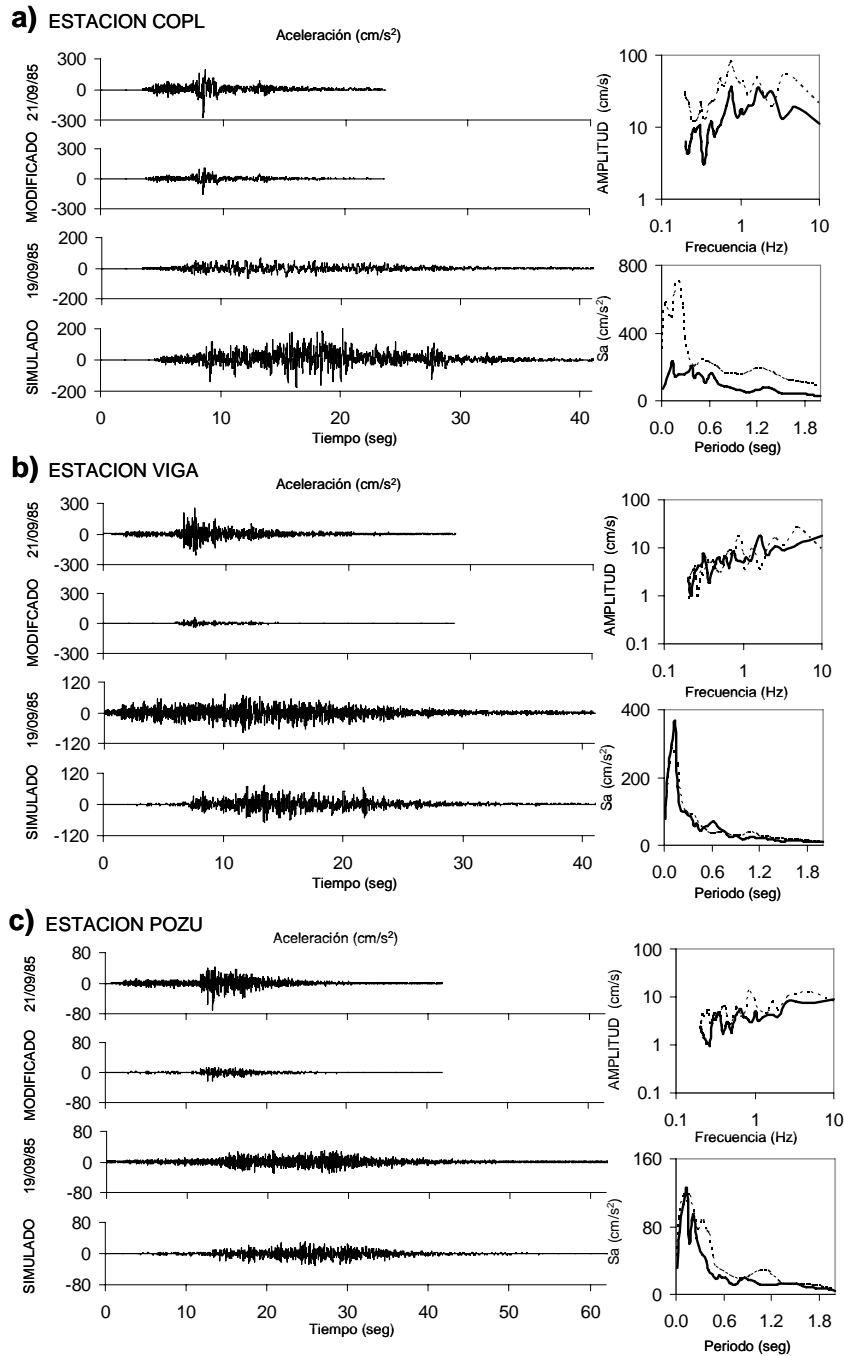


Figura 3.2. Historias de aceleración para estaciones (a) COPL, (b) VIGA y (c) POZU, del evento del 24 de Octubre usado como función de Green (superior), el evento del 24 de Octubre de 1993 modificado por atenuación (mitad-superior), el evento del 14 de Septiembre de 1995 tomado como el evento objetivo (mitad-inferior) y evento simulado (inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del esperado con el Método 5 (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-aceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y esperado

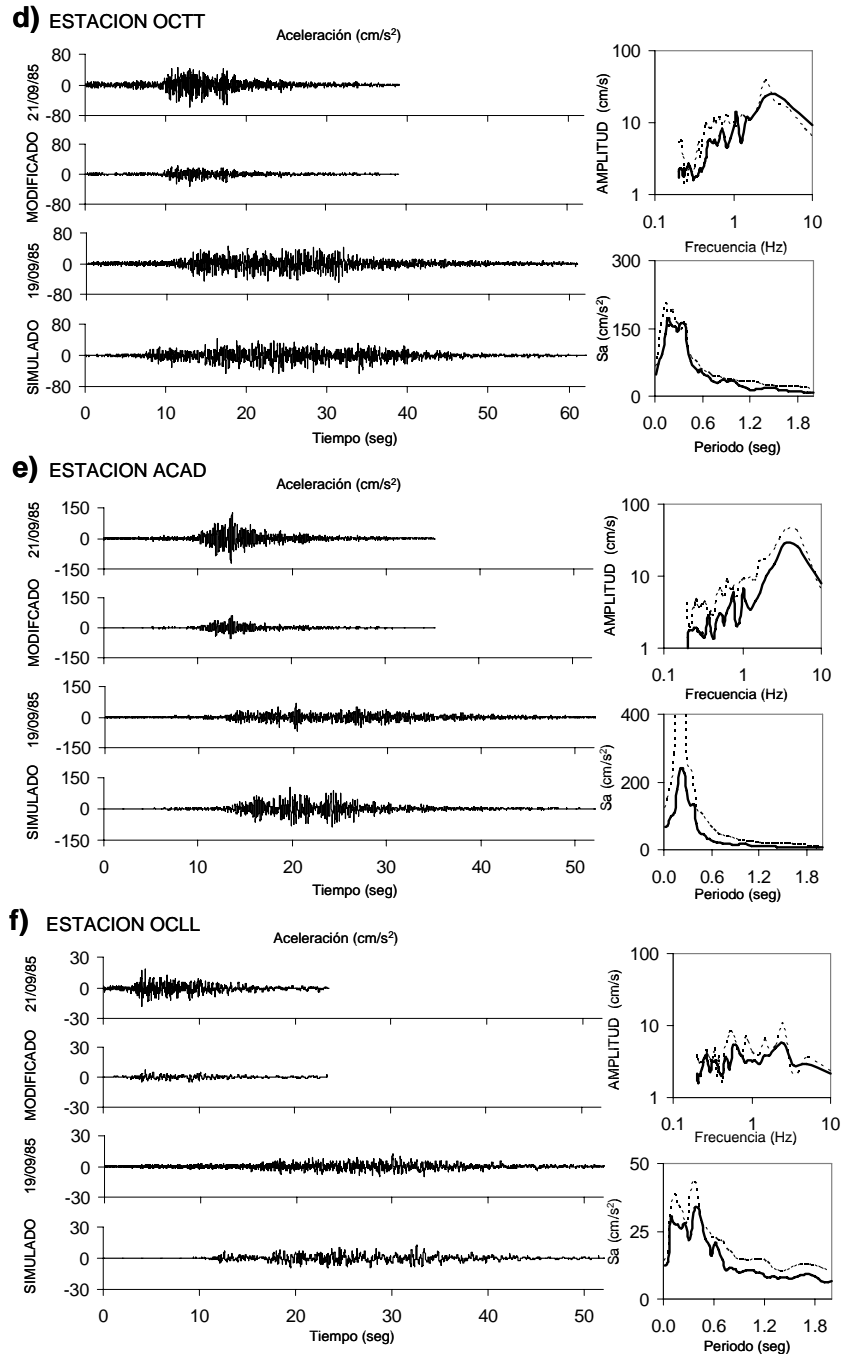


Figura 3.2 (continuación). Historias de aceleración para estaciones (d) OCTT, (e) ACAD y (f) OCLL, del evento del 24 de Octubre usado como función de Green (superior), el evento del 24 de Octubre de 1993 modificado por atenuación (mitad-superior), el evento del 14 de Septiembre de 1995 tomado como el evento objetivo (mitad-inferior) y evento simulado (inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del esperado con el Método 5 (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-aceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y esperado

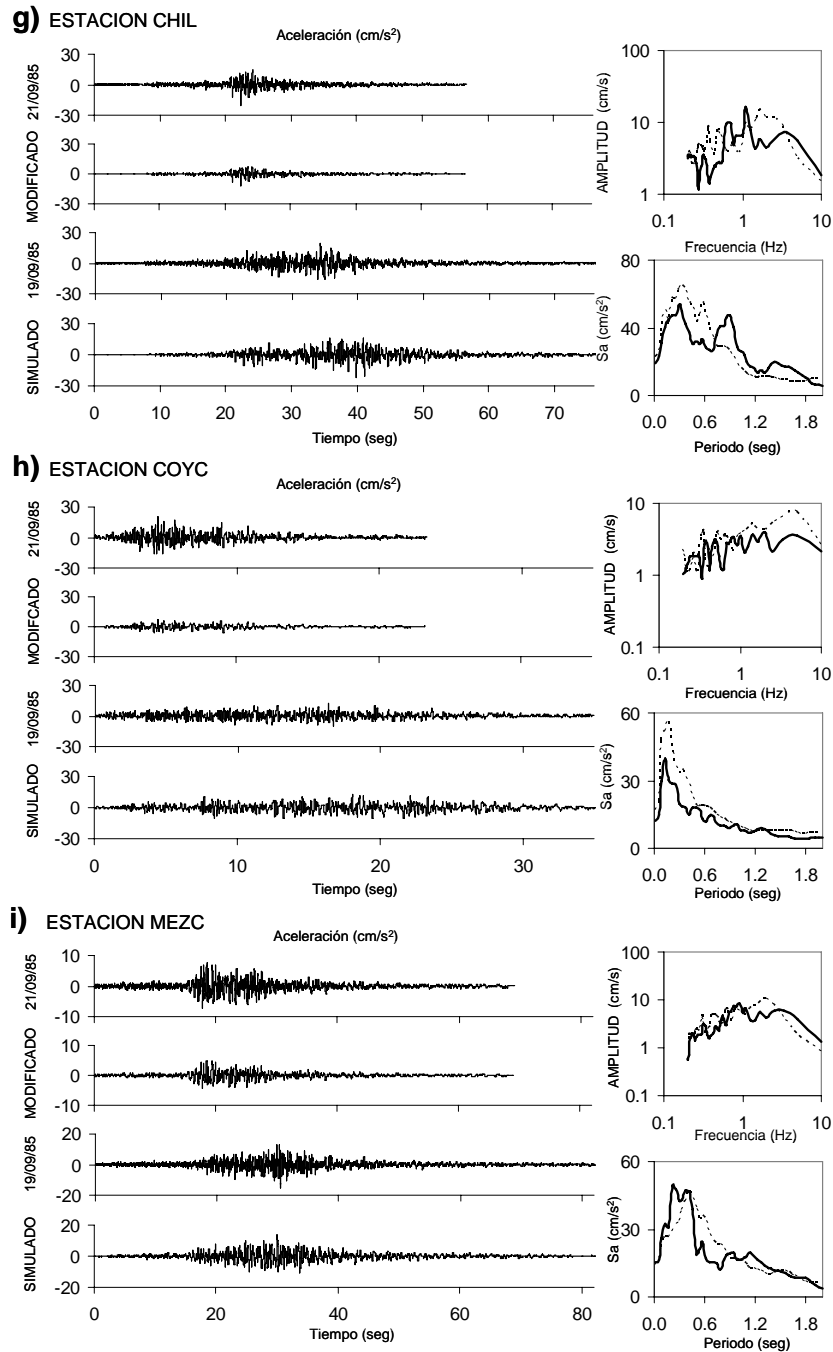


Figura 3.2 (continuación). Historias de aceleración para estaciones (g) CHIL, (h) COYC y (i) MEZC, del evento del 24 de Octubre usado como función de Green (superior), el evento del 24 de Octubre de 1993 modificado por atenuación (mitad-superior), el evento del 14 de Septiembre de 1995 tomado como el evento objetivo (mitad-inferior) y evento simulado (inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del esperado con el Método 5 (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-aceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y esperado

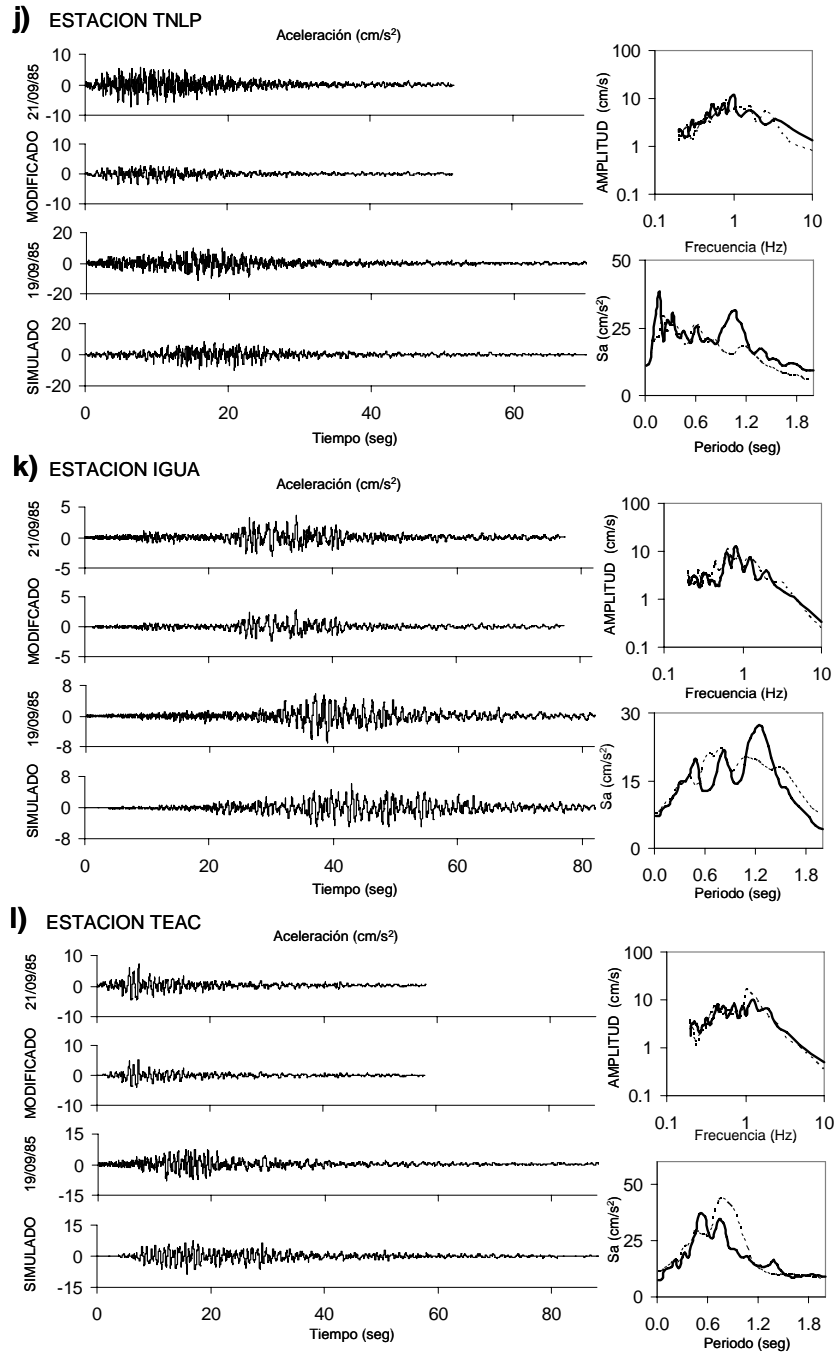


Figura 3.2 (continuación). Historias de aceleración para estaciones (j) TNLP, (k) IGUA y (l) TEAC, del evento del 24 de Octubre usado como función de Green (superior), el evento del 24 de Octubre de 1993 modificado por atenuación (mitad-superior), el evento del 14 de Septiembre de 1995 tomado como el evento objetivo (mitad-inferior) y evento simulado (inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del esperado con el Método 5 (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-aceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y esperado

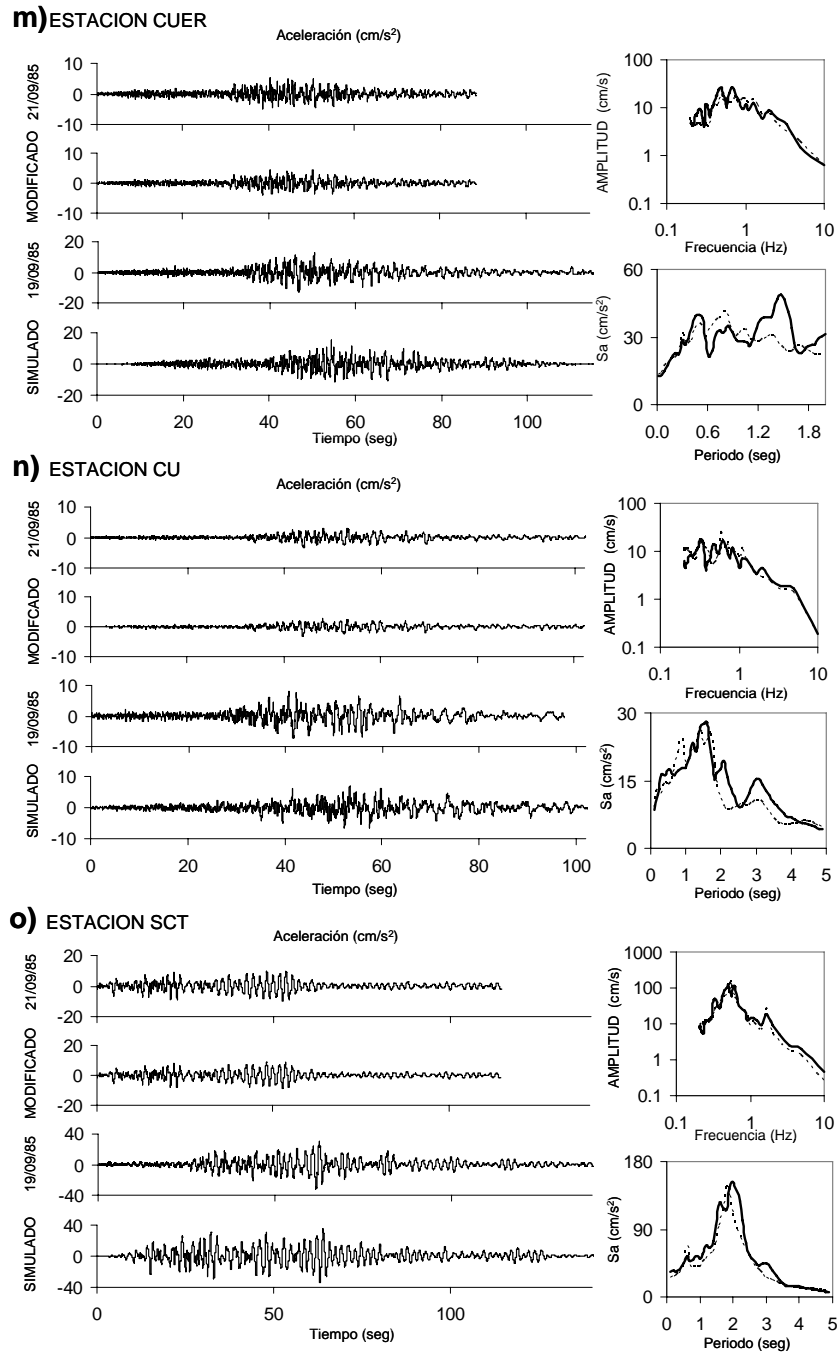


Figura 3.2 (continuación). Historias de aceleración para estaciones (m) CUER, (n) CU y (o) SCT, del evento del 24 de Octubre usado como función de Green (superior), el evento del 24 de Octubre de 1993 modificado por atenuación (mitad-superior), el evento del 14 de Septiembre de 1995 tomado como el evento objetivo (mitad-inferior) y evento simulado (inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del esperado con el Método 5 (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-aceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y esperado

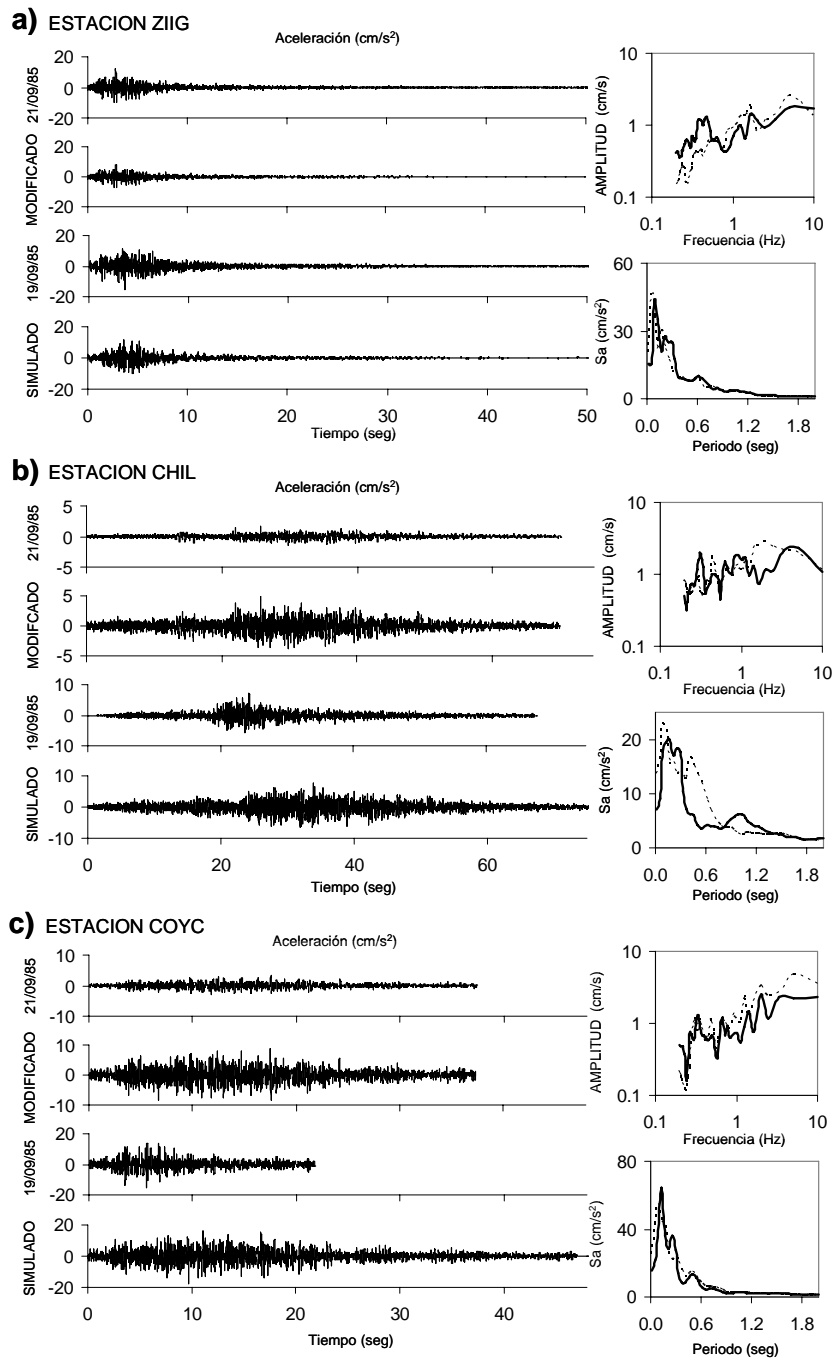


Figura 3.3. Historias de aceleración para estaciones (a) ZIIG, (b) CHIL y (c) COYC, (ver figura 2) del evento del 20 de Abril usado como función de Green (superior), el evento del 20 de Abril de 1998 modificado por atenuación (mitad-superior), el evento del 23 de Mayo de 1994 tomado como el evento objetivo (mitad-inferior) y evento simulado (inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del esperado con el Método 5 (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-aceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y esperado

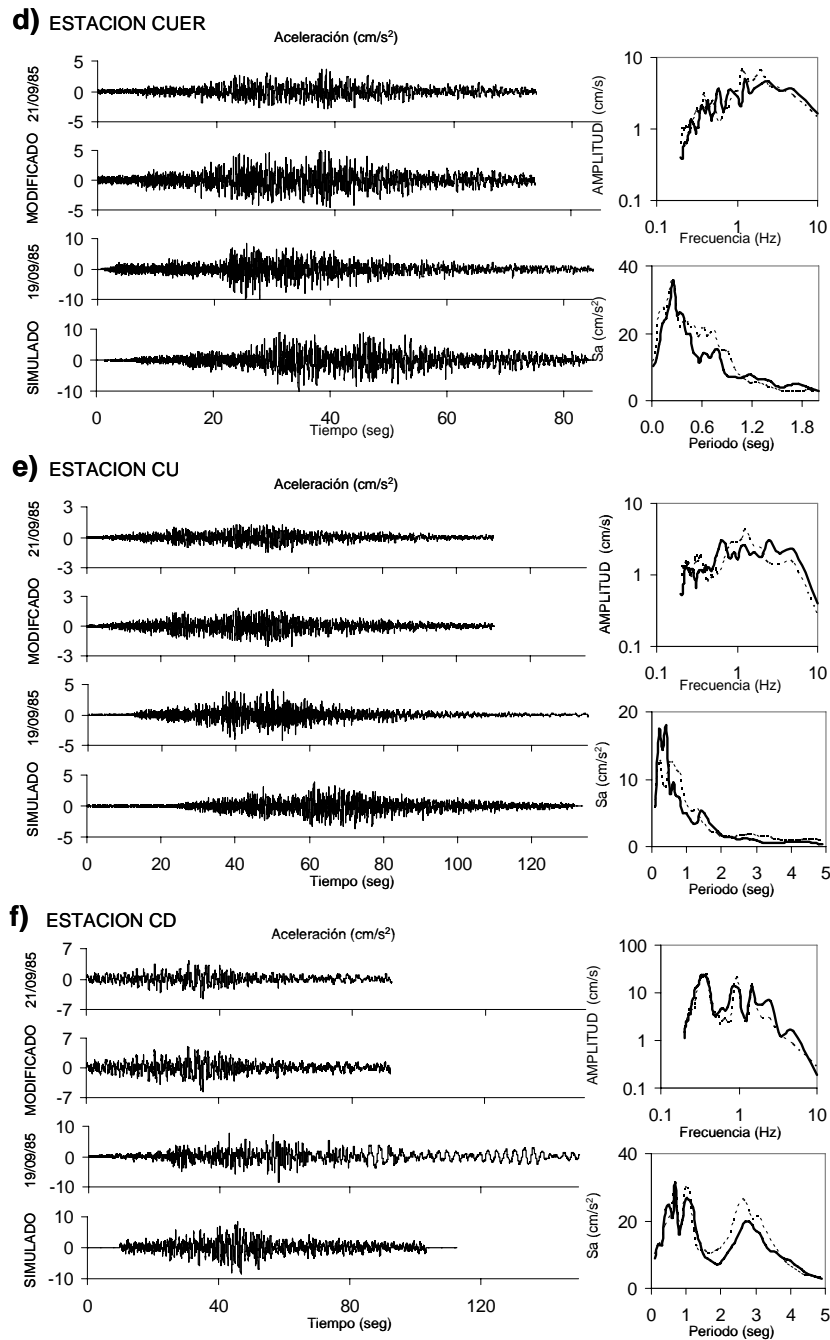


Figura 3.3 (continuación). Historias de aceleración para estaciones (d) CUER, (e) CU y (f) CD, (ver figura 2) del evento del 20 de Abril usado como función de Green (superior), el evento del 20 de Abril de 1998 modificado por atenuación (mitad-superior), el evento del 23 de Mayo de 1994 tomado como el evento objetivo (mitad-inferior) y evento simulado (inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del esperado con el Método 5 (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-aceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y esperado

Capítulo 4

Métodos para generar acelerogramas con propósitos de diseño estructural

En este capítulo se comparan cinco métodos para predecir historias de tiempo de aceleración con propósitos de diseño. Los métodos son: (1) escalando acelerogramas existentes hasta alcanzar un nivel de intensidad requerido, (2) simulando movimientos sísmicos compatibles con un espectro de diseño o un espectro de respuesta, (3) usando funciones de atenuación generalizadas, (4) aplicando un método estocástico y (5) usando la técnica de funciones de Green empíricas. Se usan registros de datos mexicanos para comparar en forma cualitativa entre los observados y los obtenidos con los métodos.

4.1 Métodos existentes

El uso de historias de tiempo de aceleración es esencial para el diseño de estructuras complejas, así como para el análisis y mitigación del riesgo sísmico. Por lo tanto, obtener historias de aceleración futuras es un tema de esencial interés para el diseño presente de estructuras eficientes y seguras. Existen muchos esfuerzos para estimar historias de tiempo en un sitio dado usando movimientos de suelo observados, así como en sitios no instrumentados. El más obvio es el uso de registros disponibles en bancos de base de datos mundiales (Bommer *et al.* 1998, 2000) con características similares; ingenieros usan este método pero muchas veces no son conscientes de las diferencias que existen entre las fuentes sísmicas, atenuación y efectos de sitio. Otra opción práctica (Método 1) es escalar acelerogramas existentes en un sitio hasta alcanzar un nivel de intensidad. Debido a su simplicidad, esta opción es también muy popular entre los ingenieros; sin embargo, escalar, sin basarse en un modelo físico, solo considera la amplitud ya que es difícil tomar en cuenta la magnitud y distancia con el cambio respectivo en el contenido de frecuencia y duración del movimiento (¿porqué se debe escalar con la aceleración máxima del suelo y no con la velocidad máxima del suelo o con el espectro de respuesta en un periodo dado?. Otro método popular (Método 2) es usar movimientos sísmicos simulados compatibles con un espectro de diseño del sitio prescripto y bien conocido; sin embargo, estas historias de tiempo no tienen la apariencia de movimientos sísmicos reales, y cuando la estructura se somete a ellos, se sobrestiman las demandas de desplazamientos y la energía de entrada (Naeim y Lew, 1995). Otra alternativa (Método 3) es desarrollar un conjunto de funciones paramétricas que describan la evolución de la intensidad instantánea y el contenido de frecuencia de la aceleración del suelo en términos de la magnitud y distancia de la fuente al sitio (Nojima y Kameda, 1988; Alamilla *et al.* 2001a) pero es necesario tener un número considerable de acelerogramas registrados en el sitio para encontrar parámetros estadísticos como una función de la magnitud y distancia. Otra opción (Método 4) es simular movimientos sísmicos basados en un modelo físico que considera la fuente, propagación de la onda y efectos de sitio (Papageorgiou y Aki, 1983; Boore 1983, 2003); y un modelo alternativo (Método 5) más conveniente para generar movimientos de fallas distantes es el propuesto por Hartzell (1978) que usa sismos registrados pequeños como funciones de Green empíricas para simular grandes sismos; estos métodos tienen la ventaja de considerar un modelo físico de la fuente, pero hay todavía incertidumbres en la estimación de parámetros sismológicos como la caída de esfuerzo, el momento sísmico, la atenuación, entre otros. Finalmente, en los últimos años, se han llevado a cabo análisis probabilísticos de la demanda sísmica para algunas estructuras (Shome y Cornell, 1998, 1999; Chan *et al.* 2005) con el propósito de encontrar, en una cierta estructura, el número de registros para ser usados,

escalando registros para estimar la demanda sísmica (Método 1). Esto incluye una desagregación del peligro de la distorsión sísmica (Baker *et al.*, 2005); esto significa encontrar los pares de magnitud y distancia que causan una cierta distorsión de entrepiso. Sin embargo, hay todavía muchos obstáculos para adoptar estos métodos en la práctica de la ingeniería común y simple. Estos métodos necesitan un número considerable de acelerogramas en el sitio para determinar el número de registros útiles para diseñar la estructura para dar una cierta distorsión de diseño. La Figura 4.1 muestra un diagrama, esquemático, que describe cada uno de estos métodos.

Los ingenieros pueden usar cualquiera de los métodos arriba descritos para obtener movimientos sísmicos y estudiar sus estructuras, pero ellos deben tener en mente que cada método tiene ventajas y desventajas que deben ser consideradas. En lo que sigue, se presenta la aplicación de cinco métodos para predecir historias de tiempo de aceleración futuros con propósitos de diseño. Todos los métodos son aplicados en estaciones cercanas a la costa de México. Se mencionan algunos problemas que podrían presentarse en su aplicabilidad en la práctica.

Se usan los registros de movimientos de suelo (componente EW) producidos por el sismo del 19 de Septiembre de 1985 ($M=8.1$) como el evento objetivo. Se presentan únicamente resultados de estaciones fuera de la Ciudad de México que registraron tal evento. La Figura 4.2 muestra la superficie de ruptura, la localización de los epicentros y estaciones usadas en este estudio. A continuación, se comparan de forma cualitativa las historias de tiempo de aceleración, espectros de amplitudes de Fourier y de respuesta con aquellos calculados con los cinco métodos mencionados.

4.2 Método 1: Escalar acelerogramas de un sitio hasta alcanzar un nivel de intensidad requerido

En este método la amplitud de cada uno de los movimientos sísmicos registrados en el sitio estudiado es modificada por un factor de escala. Este factor es un valor numérico que multiplica la historia de aceleración del registro hasta alcanzar un nivel de intensidad (*p.e.* la aceleración máxima del suelo, ordenada sísmica, entre otros). Para este estudio, se consideró como medida de intensidad la aceleración máxima del suelo (PGA, *Peak Ground Acceleration*). Los eventos se escalaran para alcanzar el nivel de intensidad registrado en cada estación debido al evento del 19 de septiembre 1985. Recordemos que deseamos comparar los movimientos obtenidos del Método 1 con el evento objetivo (19 septiembre 1985). Para hacer uso de este método, se utilizaron los registros de los registros de los eventos del 21 de septiembre de 1985 y 25 de abril de 1989. Ellos son escalados para obtener la aceleración máxima del suelo del evento objetivo. Tabla 4.1 da los valores de aceleración máxima del suelo del evento objetivo y los factores de escala, F_{esc} , usados en cada estación. Las Figuras 4.3 y 4.4 muestran datos y escalamiento usando el evento del 25 de abril de 1989 y el 21 de septiembre de 1985 como evento a escalar, respectivamente. Se incluyen historias de aceleración, así como espectro de amplitudes de Fourier y de respuesta observados y escalados. Se comparan los espectros de respuesta observados de cada estación para el evento del 19 de septiembre con el correspondiente espectro escalado. Se puede observar que en estaciones relativamente cercanas a la fuente (*p.e.* PARS, ATYC y CAYA), al usar el evento del 25 de abril como evento a escalar, se tiene una buena aproximación de las intensidades espectrales; pero no ocurre así para estaciones lejanas de la fuente (*p.e.* CPDR). Sin embargo, si observamos las historias de aceleración, se observa que hay una mala aproximación con la del evento objetivo. Al usar el evento del 21 de septiembre como el evento escalado, se obtienen buenas aproximaciones, tanto en estaciones cercanas como lejanas, al calcular el espectro de amplitudes de Fourier y el de respuesta; sin embargo, nuevamente las historias de tiempo no concuerdan con las observadas durante el evento objetivo.

4.3 Método 2: Simular movimientos sísmicos compatibles con un espectro de diseño

Se generan historias de tiempo compatibles con el espectro de diseño (HTCED) usando el programa SATGEN (Pérez *et al.* 2006). El método usa un procedimiento iterativo que envuelve las amplitudes de Fourier de la señal procesada para acoplarse a las amplitudes correspondientes al espectro de diseño o de respuesta de aceleración objetivo. El espectro de diseño es obtenido del manual de la Comisión Federal de Electricidad considerando la ubicación de cada sitio. La Figura 4.5 muestra las historias de aceleración del evento objetivo (19 de septiembre de 1985), así como las historias de aceleración acopladas al espectro de diseño que debe aplicarse para cada sitio. Debido a que el espectro de diseño gobierna para todas las estaciones, las historias de aceleración son comparadas solamente en algunas estaciones, así como el espectro de respuesta observado y calculado. En la figura se puede observar que la respuesta de la historia de aceleración calculada con el Método 2 (línea gris) se acopla en forma aceptable al espectro de diseño (línea oscura). Sin embargo, las historias de aceleración obtenidas con el Método 2 no son semejantes a las del evento objetivo; incluso no tienen una apariencia real. Esto es debido a que el proceso para pasar de un espectro de aceleraciones al espectro de amplitudes de Fourier proviene de un proceso que se considera estacionario.

Por otro lado, se calcula los movimientos sísmicos compatibles con el espectro de respuesta producido por el sismo del 19 de septiembre de 1985 (ver Figura 4.6). Nuevamente, se puede observar que las historias de tiempo no tienen una apariencia real, debido a lo señalado anteriormente, aun cuando las historias se hacen compatibles al espectro de respuesta requerido.

4.4 Método 3: Desarrollar funciones de atenuación generalizadas

Se usan parámetros y funciones de atenuación generalizadas (Alamilla *et al.* 2001a) para calcular historias de aceleración en terreno firme correspondientes a sismos generados en la costa de México. Este Método 3, considera las historias de aceleración como una realización de un proceso estocástico Gaussiano no-estacionario, con parámetros estadísticos dependientes de la magnitud y distancia. En la Figura 4.7 se muestra dos historias de aceleración simulada obtenidas en cada estación comparada con la observada para el evento objetivo. Se puede observar que no hay una buena aproximación en las historias de tiempo entre las obtenidas con el Método 3 y las observadas. Sin embargo, el Método 3 provee una buena estimación de la esperanza de las intensidades del espectro de Fourier y de respuesta (línea delgada) para sitios cercanos e intermedios a la fuente con respecto la observada (línea gruesa); pierde precisión para sitios lejanos de la fuente.

El Método 3 puede considerarse útil en aplicaciones para predecir movimientos de suelo para intervalos de magnitudes y distancias en donde no existe estaciones instrumentadas; además podría ser muy práctico su uso cuando se use el Método 5: la técnica de funciones de Green empíricas.

4.5 Método 4: Usar método estocástico

Este método es ampliamente usado para predecir movimientos de suelo para regiones del mundo en las cuales registros de movimientos sísmicos potencialmente perjudiciales no son disponibles. El método combina descripciones paramétricas o funcionales del espectro de amplitudes del movimiento del suelo con un espectro de fase aleatorio modificado (ver Boore 1988, 2003). El método necesita parámetros sismológicos los cuales son presentados en la Tabla 1 del apéndice 3. El momento sísmico para el evento objetivo es $M_{0S}=1.05 \times 10^{28}$ dina-cm y la caída de esfuerzo es $\Delta\sigma_S=150$ bar (ver Tabla 1 del apéndice 3). Otros parámetros para considerar la atenuación son mencionados dentro del texto del apéndice 3. Para considerar la duración dependiente de la magnitud y distancia es usada la expresión

propuesta por Reinoso y Ordaz (2001). No se considera el factor por efectos de sitio, porque en estos sitios elegidos no existen efectos de sitio (excepto en la estación TEAC). En la Figura 4.8 se muestra las historias de aceleración obtenidas con el Método 4 y las registradas durante el evento objetivo. Se puede observar que para estaciones relativamente cercanas a la fuente (*p.e.* AZIH) la predicción es muy mala debido a que no se considera efectos de directividad en el modelo. En estaciones intermedias y lejanas (excepto estación TEAC) la predicción es relativamente aceptable para periodos mayores a 0.6 segundos. Esto es debido posiblemente a que existen efectos de sitio, en todas las estaciones, los cuales resultan importantes en periodos estructurales bajos ($T < 0.6$ seg). Esto se puede observar en la predicción del espectro de respuesta esperado debido al Método 4. Se observa que el espectro de respuesta calculado con el método 4 es aceptable para periodos estructurales mayores a 0.6 seg; sin embargo, para periodos menores al mencionado, se subestiman las ordenadas sísmicas. Por lo tanto, en lo posible, se debe incluir efectos de sitio al utilizar este tipo de método.

4.6 Método 5: Utilizar técnica de funciones de Green empíricas

Se usa la técnica de funciones de Green empíricas (Ordaz *et al.* 1995) y una expresión para modificar la función de Green por atenuación (Jaimes *et al.* 2006a) para generar historias de aceleración producidas por el sismo del 19 de Septiembre de 1985 usando como funciones de Green empíricas los registros del evento del 21 de Septiembre de 1985. En la Figura 3.1 del capítulo 3 se muestra las historias de aceleración, así como las historias de aceleración resultado de este método. En general, de acuerdo a lo mencionado en el capítulo 3 y apéndice III el método muestra una buena aproximación entre los movimientos observados y simulados para estaciones localizadas a distancias intermedias y lejanas de la fuente sísmica; sin embargo, en estaciones cercanas a la fuente el método pierde precisión, posiblemente a los efectos de directividad.

4.7 Discusión

Se presentaron cinco métodos para obtener historias de tiempo de aceleración con propósitos de diseño. Estos métodos han sido usados en muchos estudios para evaluar el comportamiento de estructuras, y en el análisis de riesgo sísmico en muchos sitios. Todos los métodos tienen ventajas y desventajas, y entender su aplicación y limitaciones es muy importante para el futuro uso de ellos.

De los resultados presentados aquí, el Método 1, escalando acelerogramas existentes de un sitio hasta alcanzar un nivel requerido de intensidad, presenta una buena aproximación con respecto al evento objetivo en amplitud; sin embargo, no toma en cuenta el cambio respectivo en el contenido de frecuencia y duración en las historias de aceleración. Esto es importante cuando se desea conocer el daño acumulado o degradación producida por el comportamiento de histéresis. Por otro lado, un sismo de magnitud pequeña tiene una forma espectral diferente a la de un sismo con mayor magnitud; el escalamiento, que se da de manera física, resulta muy diferente. La región sísmica también influye de manera importante en el escalamiento del movimiento sísmico. Cuando, se usan registros provenientes de la misma región sísmica, los resultados son aceptables y es posible obtener intensidades similares a un evento ocurrido en la región. Por otro lado, si es usado un movimiento registrado de una región diferente a la requerida, tal efecto resulta importante. Por lo tanto, no es aconsejable usar registros para escalar de otra fuente sísmica que no sea la deseada. Otro problema con el Método 1 es que necesita un registro confiable, y no es el caso para muchos sitios.

El Método 2 usa un procedimiento que envuelve las amplitudes de Fourier de la señal procesada para acoplarse a la correspondiente amplitud del espectro de respuesta de aceleraciones objetivo. Este método usa la teoría de vibraciones aleatorias, junto con una duración del movimiento fuerte, pasos que

introducen aproximaciones que reducen su confiabilidad. Además, el Método 2 asume un proceso estacionario, por lo tanto la señal generada no tiene la apariencia de sismos reales y, de acuerdo a lo señalado por Naiem y Lew (1995), se sobreestiman las demandas de desplazamiento y la energía de entrada al sujetar una estructura a estos movimientos.

En el Método 3, las intensidades espectrales son semejantes a las observadas, pero al obtener los eventos simulados, el Método 3 no es capaz de representar señales semejantes a la señal objetivo, debido a las restricciones impuestas en la función moduladora de amplitud y frecuencia. Sin embargo, el Método 3 puede considerarse útil en aplicaciones para predecir intensidades sísmicas para intervalos de magnitudes y distancias en donde no existe estaciones instrumentadas; además podría ser muy práctico su uso cuando se use el Método 5: la técnica de funciones de Green empíricas.

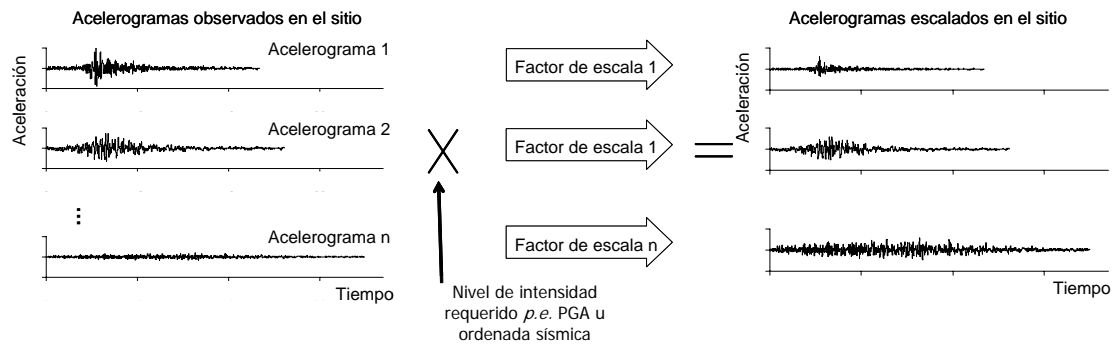
El Método 4 es ampliamente usado para predecir movimientos de suelo en sitios en los cuales los registros de movimientos no están disponibles. Las características esenciales es que toman en cuenta varios factores que afectan al movimiento del suelo (fuente, dirección y sitio) dentro de formas funcionales simples. Por lo tanto, el Método 4 debe ser usado cuando los registros de movimientos no están disponibles. Pero, si existen registros en el lugar, otros métodos se deben usar.

De los resultados presentados en este trabajo, es claro que usar el Método 5 para casi cualquier sitio instrumentado (excepto cerca de la fuente) es la mejor manera para obtener historias de aceleración. Para sitios no instrumentados, es posible aplicar el Método 5, con ayuda del Método 3 o Método 4. Con alguno de estos dos métodos se generan movimientos sísmicos, que se consideran como funciones de Green; a las cuales se le aplica la técnica de funciones de Green y se obtiene una señal simulada (Kamae *et al.* 1991; Aguirre, 2005).

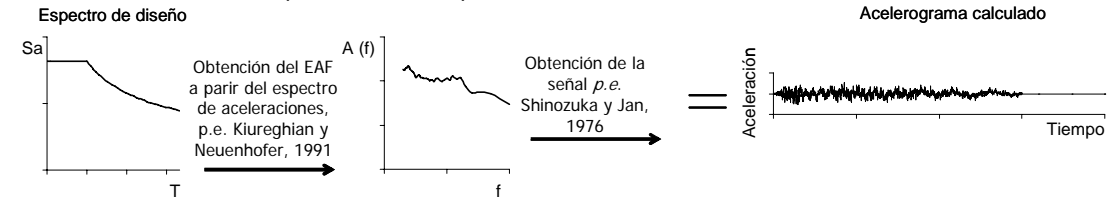
Tabla 4.1 Estaciones, distancias y sismos usados en la dirección EW. También es indicado el factor de escala, F_{esc} , al usar el Método 1

Estación	Lat.	Lon.	19/09/85		21/09/85			25/04/89		
			PGA (cm/s^2)	R (km)	PGA (cm/s^2)	F_{esc}	R (km)	PGA (cm/s^2)	F_{esc}	R (km)
ATYC	17.211	100.431	59.44	134	74.79	0.79	99	16.04	3.71	127
AZIH	17.603	101.455	161.10	33	133.14	1.21	28	-	-	-
CAYA	17.045	100.266	48.43	159	45.78	1.06	121	22.69	2.13	101
COYC	16.968	100.084	34.97	181	42.12	0.83	143	85.18	0.41	80
CPDR	16.769	99.633	15.63	235	12.44	1.26	198	92.93	0.17	27
OCTT	17.250	99.511	55.80	224	-	-	-	-	-	-
PAPN	17.328	101.040	116.65	76	243.09	0.48	30	-	-	-
PARS	17.344	100.214	89.00	147	-	-	-	102.20	0.87	118
SUCH	17.226	100.642	81.37	114	86.13	0.94	76	-	-	-

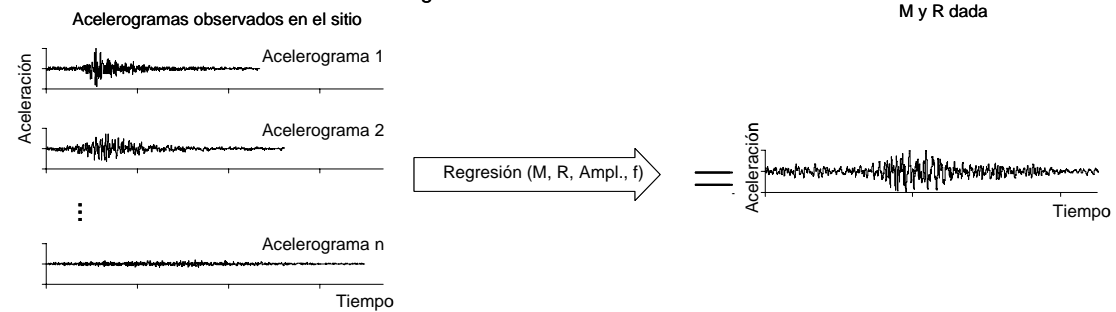
Método 1: Escalar acelerogramas de un sitio hasta alcanzar un nivel requerido de intensidad



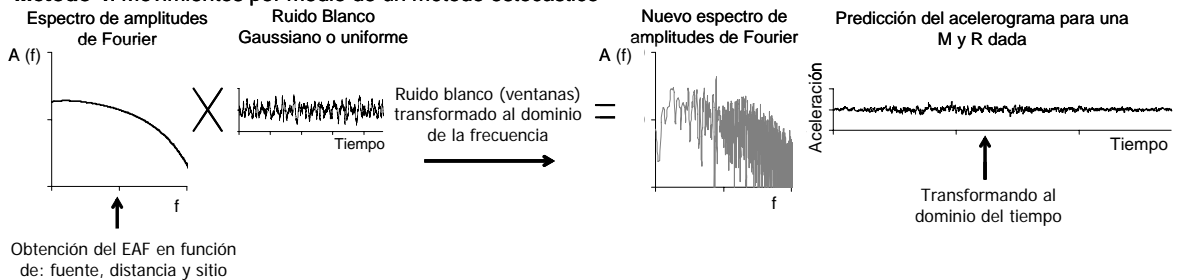
Método 2: Movimientos compatibles con un espectro de diseño



Método 3: Movimientos usando funciones generalizadoras



Método 4: Movimientos por medio de un método estocástico



Método 5: Movimientos con la técnica de funciones de Green empíricas

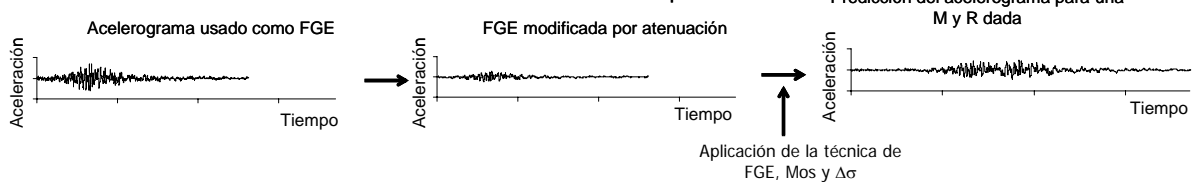


Figura 4.1. Diagrama de los métodos usados en este trabajo para obtener historias de aceleración con propósitos de diseño. Las figuras corresponden al sitio COYC pero fue aplicado a todos los sitios

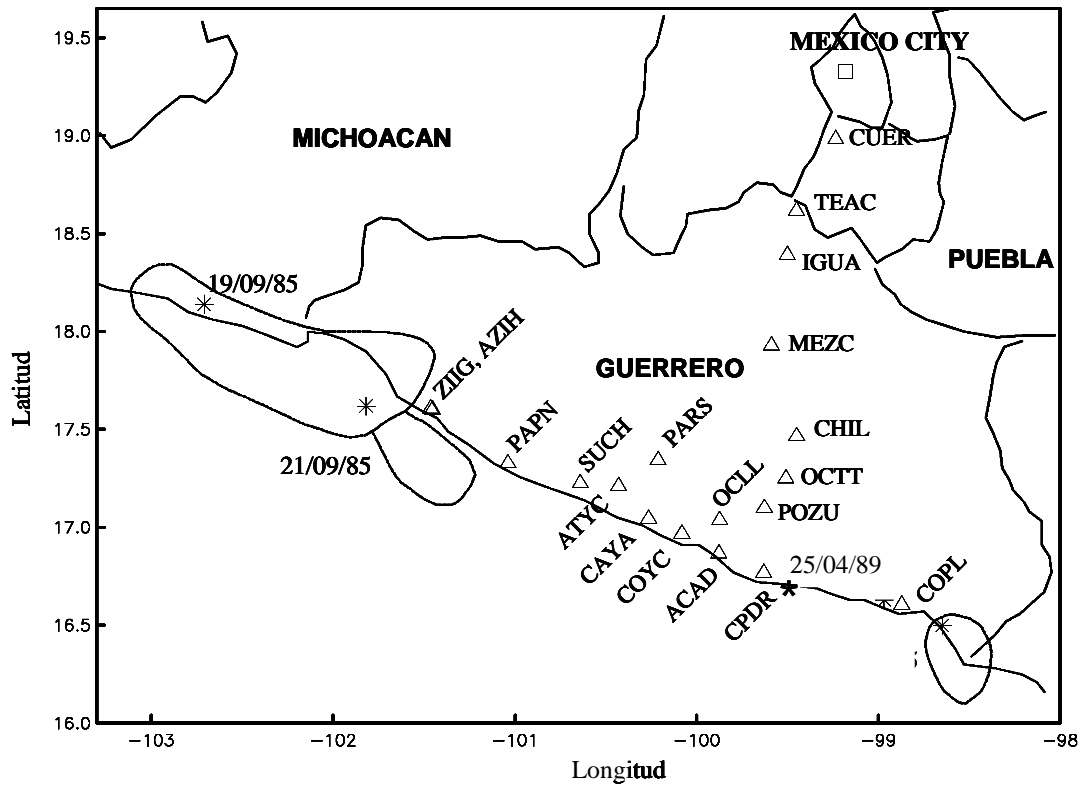


Figura 4.2. Mapa del sureste de México mostrando la localización de estaciones fuera del valle de México, y epicentros y áreas de ruptura de los eventos mostrados en la Tabla 4.1

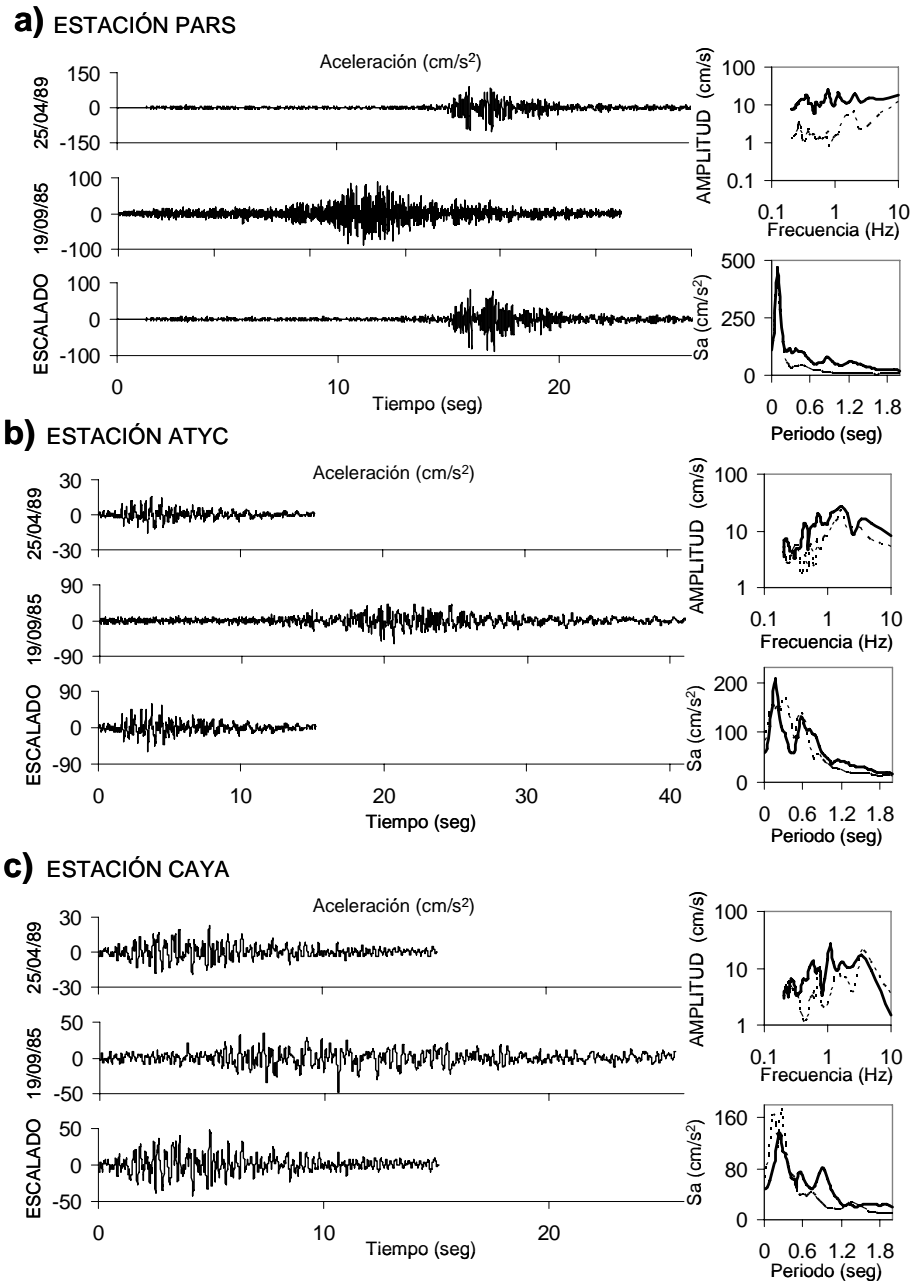


Figura 4.3. Historias de aceleración para estaciones (a) PARS, (b) ATYC y (c) CAYA, (ver figura 4.2) del evento del 25 de Abril de 1989 usado como evento a escalar (superior), el 19 de Septiembre de 1985 tomado como el evento objetivo (mitad), y el evento escalado (Método 1, inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del escalado (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-aceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y escalado

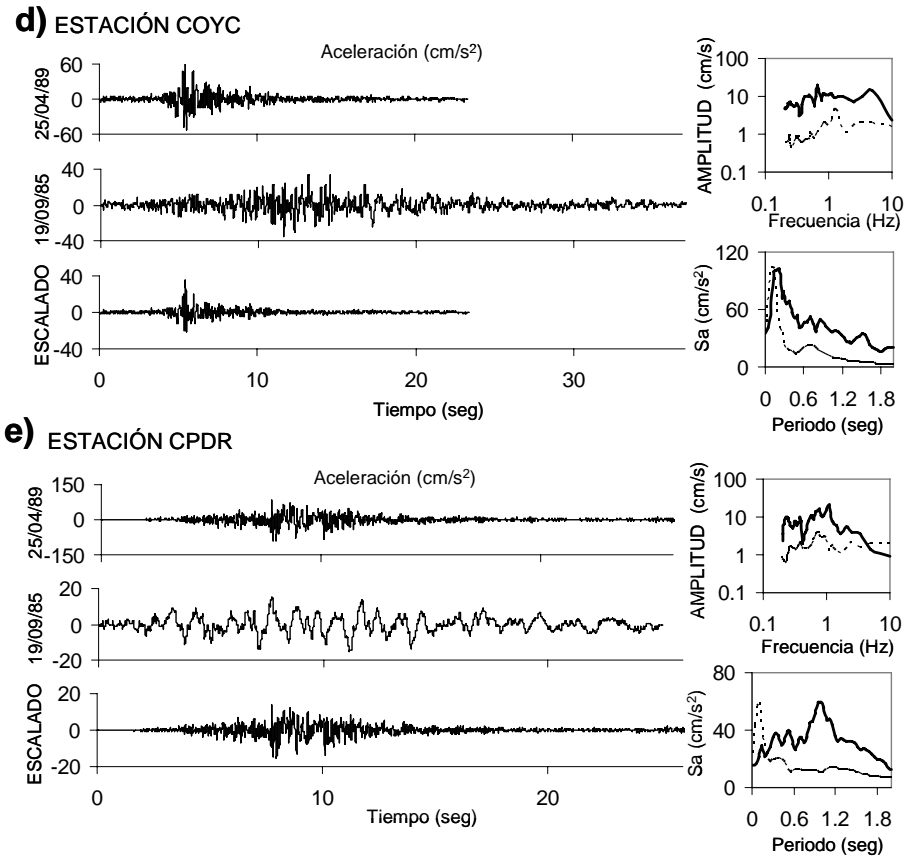


Figura 4.3. (continuación). Historias de aceleración para estaciones (d) COYC y (e) CPDR, (ver figura 4.2) del evento del 25 de Abril de 1989 usado como evento a escalar (superior), el 19 de Septiembre de 1985 tomado como el evento objetivo (mitad), y el evento escalado (Método 1, inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del escalado (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-aceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y escalado

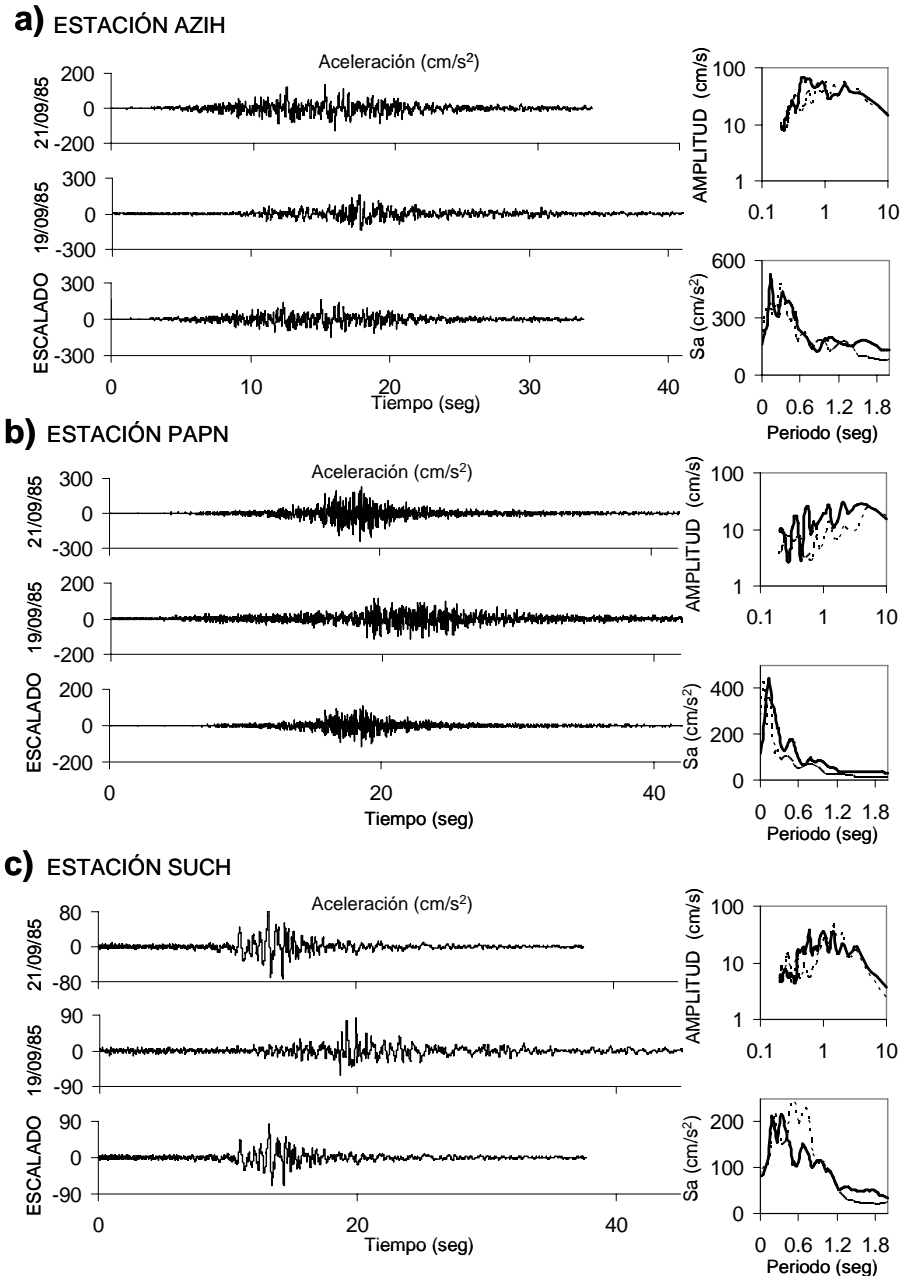


Figura 4.4. Historias de aceleración para estaciones (a) AZIH, (b) PAPN y (c) SUCH, (ver figura 4.2) del evento del 21 de Septiembre de 1985 usado como evento a escalar (superior), el 19 de Septiembre de 1985 tomado como el evento objetivo (mitad), y el evento escalado (Método 1, inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del escalado (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-aceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y escalado

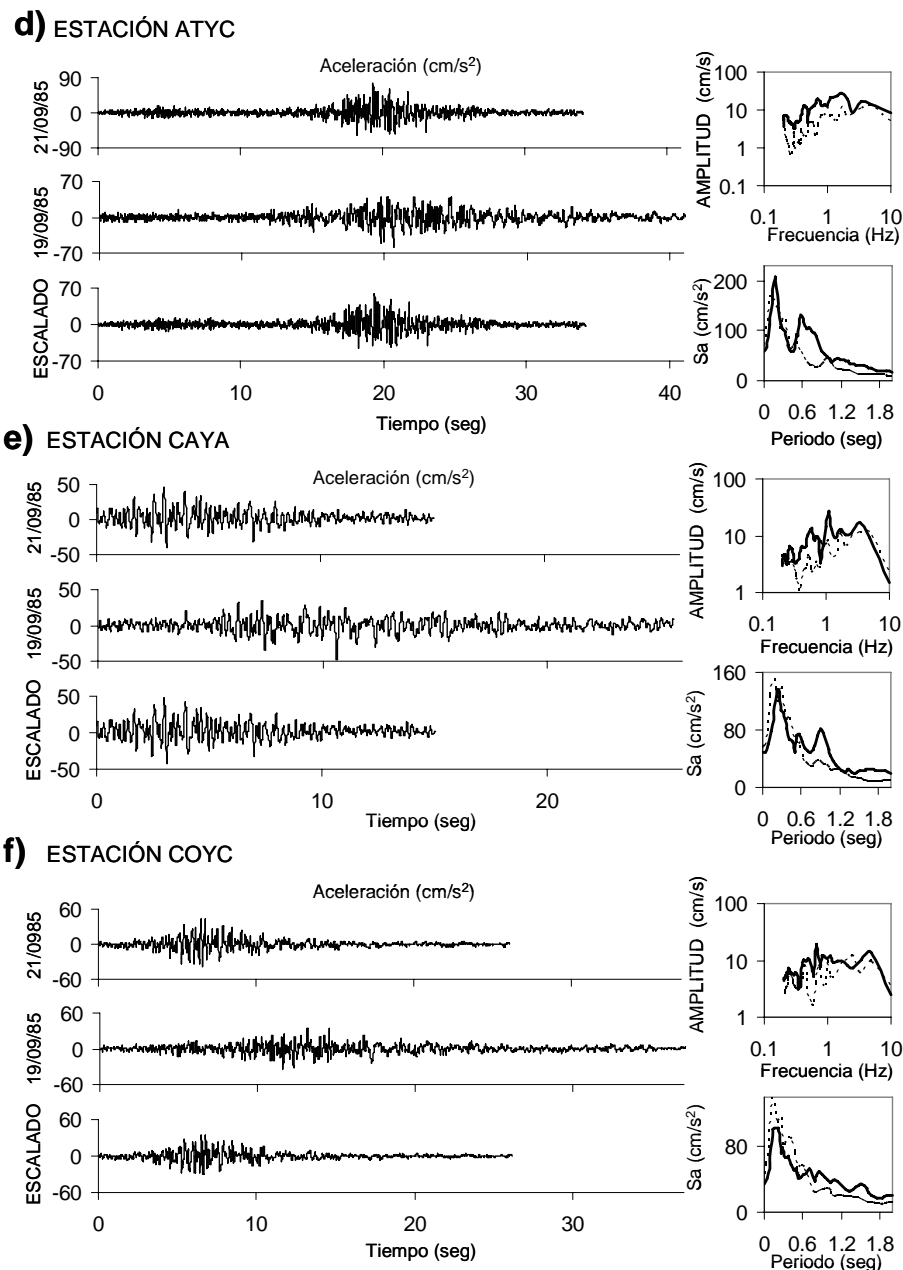


Figura 4.4. (continuación) Historias de aceleración para estaciones (d) ATYC, (e) CAYA y (f) COYC, (ver figura 4.2) del evento del 21 de Septiembre de 1985 usado como evento a escalar (superior), el 19 de Septiembre de 1985 tomado como el evento objetivo (mitad), y el evento escalado (Método 1, inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del escalado (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-aceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y escalado

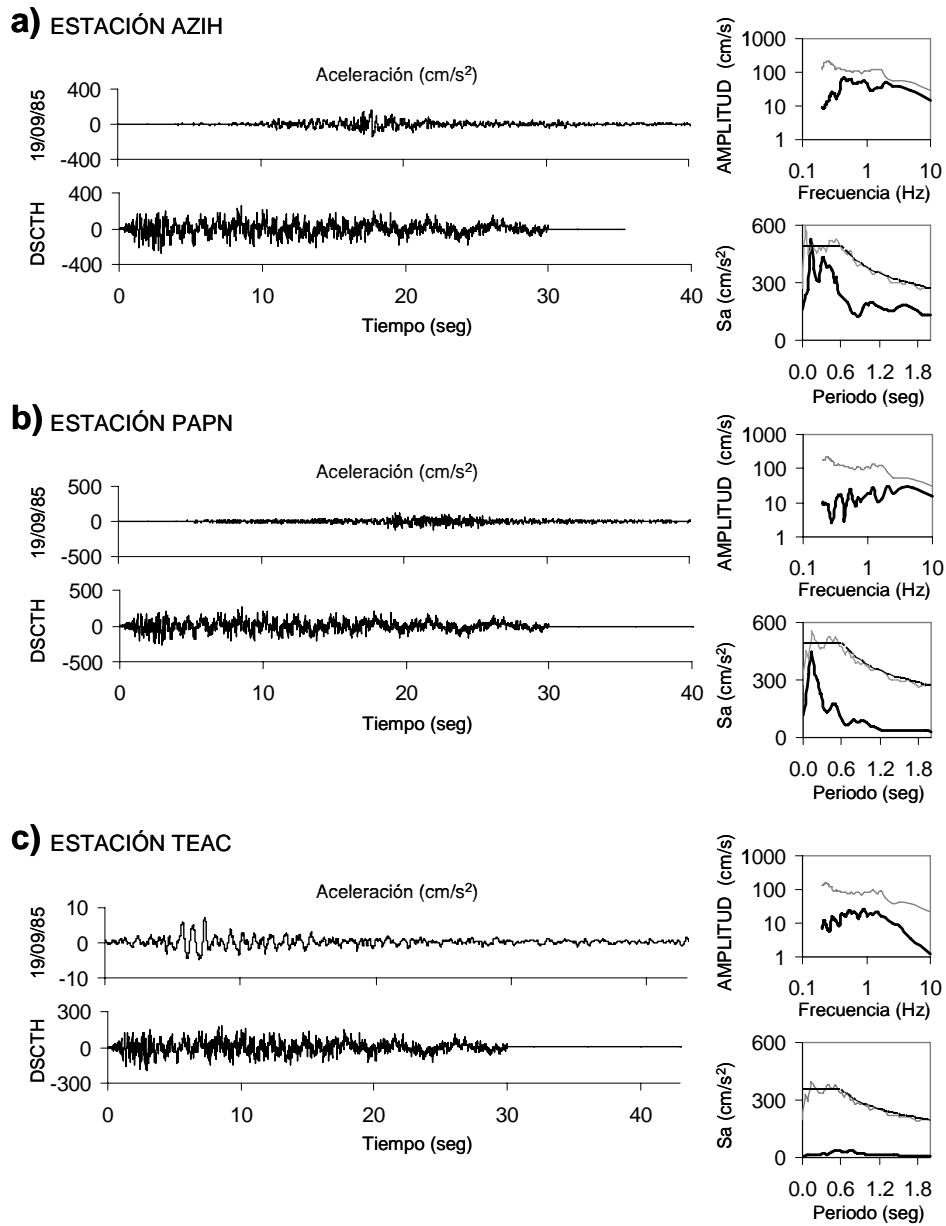


Figura 4.5. Historias de aceleración para estaciones (a) AZIH, (b) PAPN y (c) TEAC, (ver figura 4.2) del evento del 19 de Septiembre de 1985 tomado como el evento objetivo (superior) y el evento compatible con el espectro de diseño en el sitio (Método 2, inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del obtenido con el Método 2 (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de diseño (línea continua) y el espectro de respuesta del método 2 (pseudoaceleración, 5 % amortiguamiento, línea discontinua)

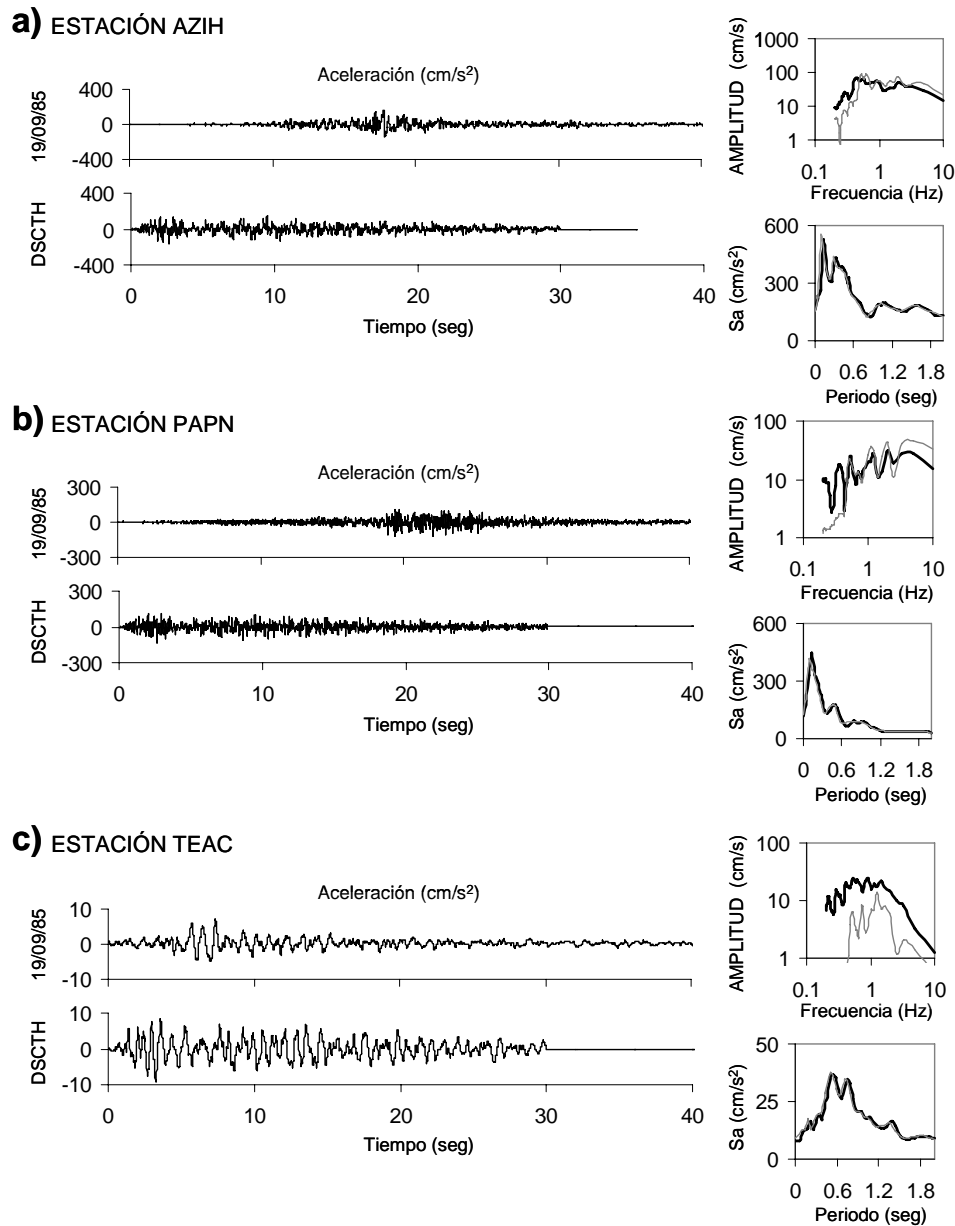


Figura 4.6. Historias de aceleración para estaciones (a) AZIH, (b) PAPN y (c) TEAC, (ver figura 4.2) del evento del 19 de Septiembre de 1985 tomado como el evento objetivo (superior) y el evento compatible con el espectro de respuesta del evento objetivo en el sitio (Método 2, inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del obtenido con el Método 2 (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-aceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y obtenido con el Método 2

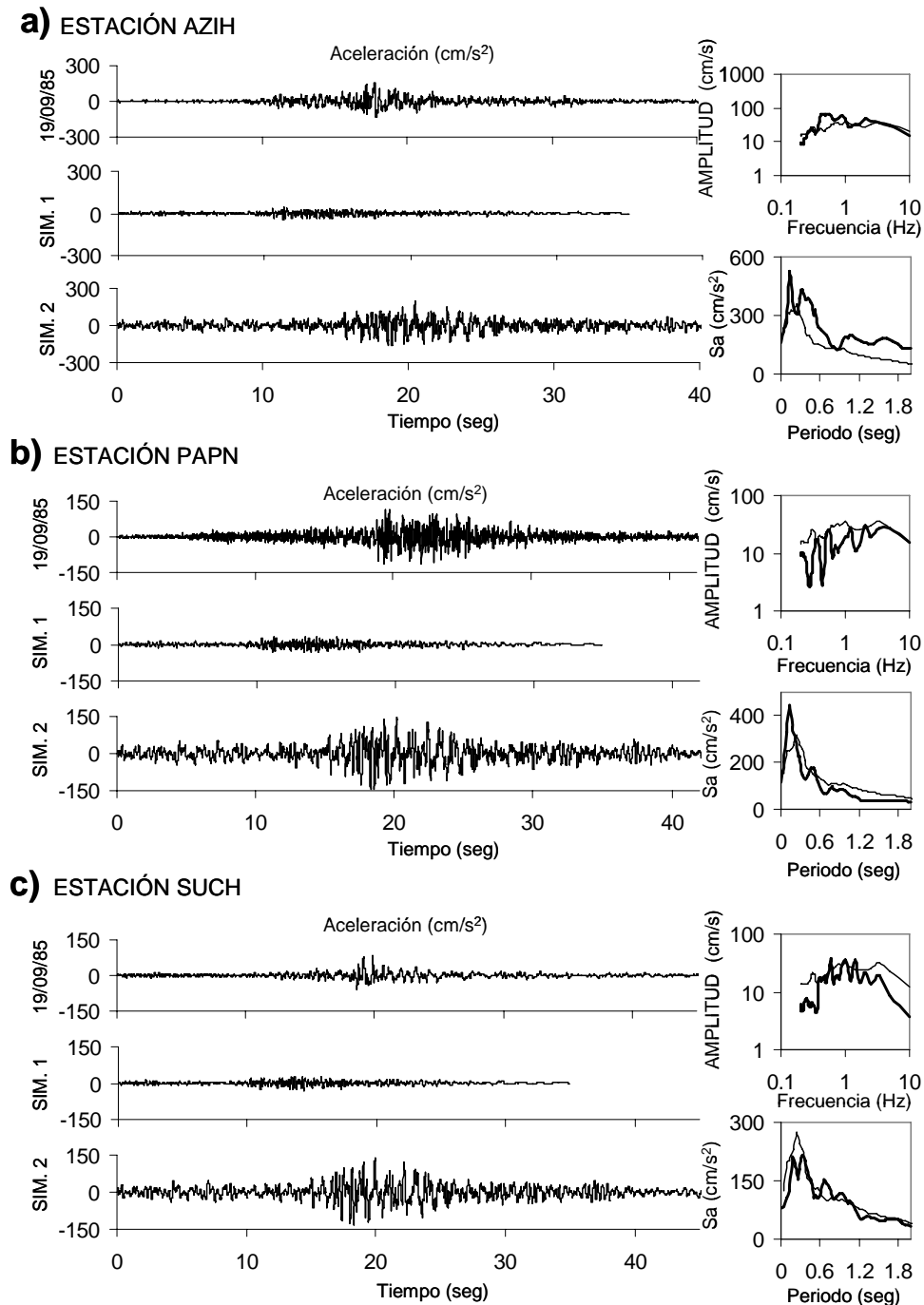


Figura 4.7. Historias de aceleración para estaciones (a) AZIH, (b) PAPN y (c) SUCH, (ver figura 4.2) del evento del 19 de Septiembre de 1985 tomado como el evento objetivo (superior) y dos eventos simulados con el Método 3: Usando funciones de atenuación generalizadas (mitad e inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del esperado con el Método 3 (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-aceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y esperado

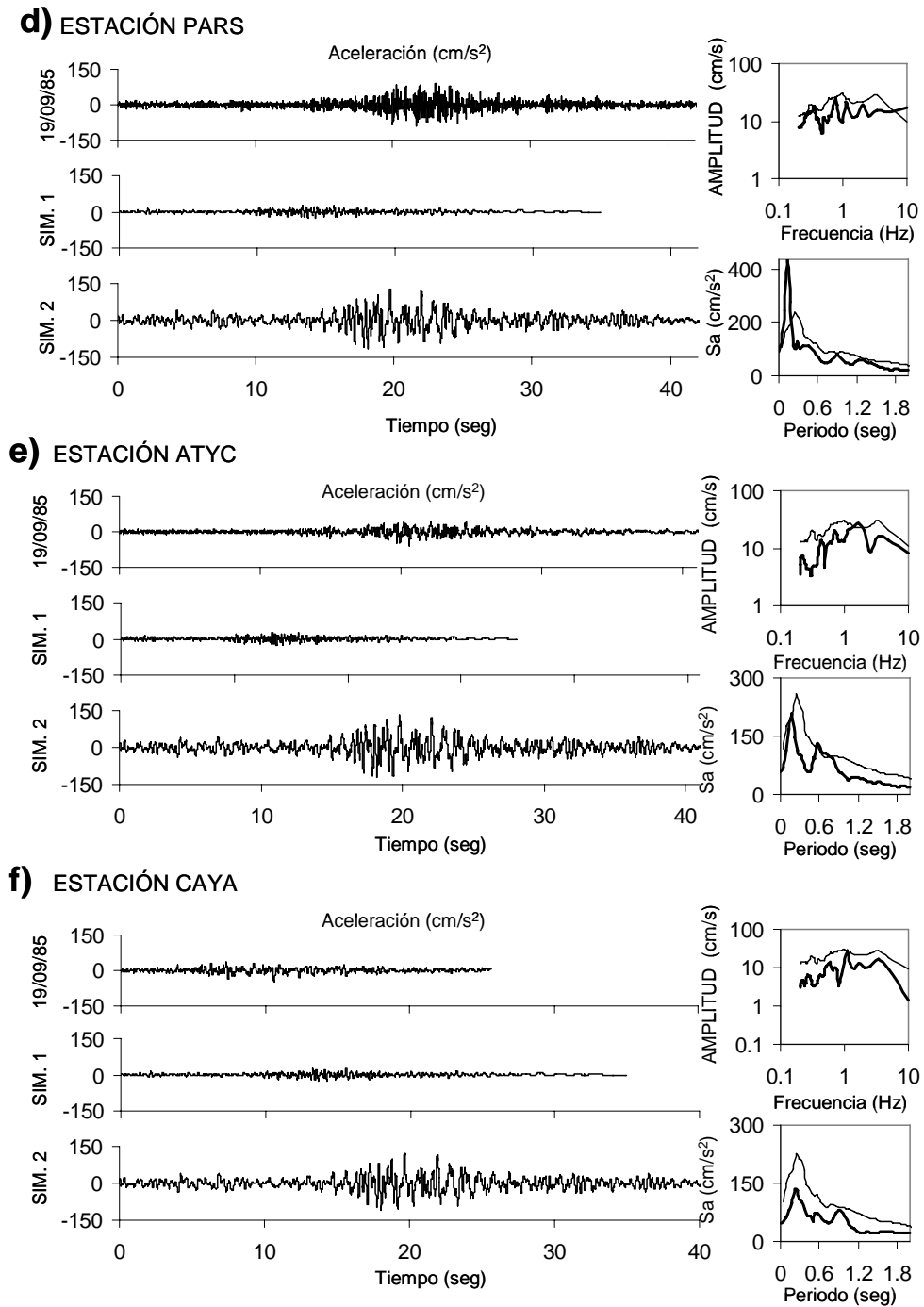


Figura 4.7. (continuación). Historias de aceleración para estaciones (d) PARS, (e) ATYC y (f) CAYA, (ver figura 4.2) del evento del 19 de Septiembre de 1985 tomado como el evento objetivo (superior) y dos eventos simulados con el Método 3: Usando funciones de atenuación generalizadas (mitad e inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del esperado con el Método 3 (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-aceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y esperado

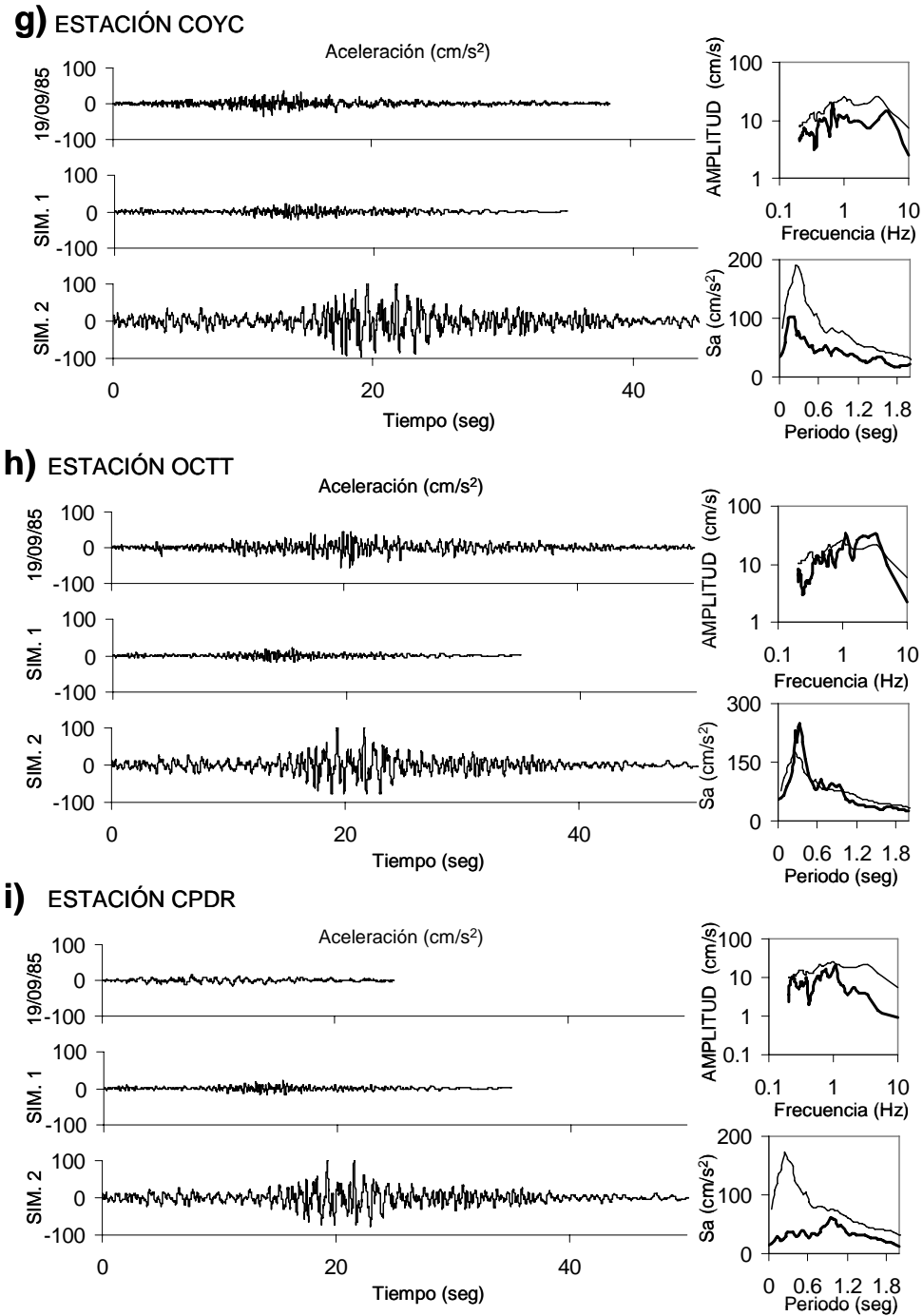


Figura 4.7 (continuación). Historias de aceleración para estaciones (g) COYC, (h) OCTT y (i) CPDR, (ver figura 4.2) del evento del 19 de Septiembre de 1985 tomado como el evento objetivo (superior) y dos eventos simulados con el Método 3: Usando funciones de atenuación generalizadas (mitad e inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del esperado con el Método 3 (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-aceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y esperado

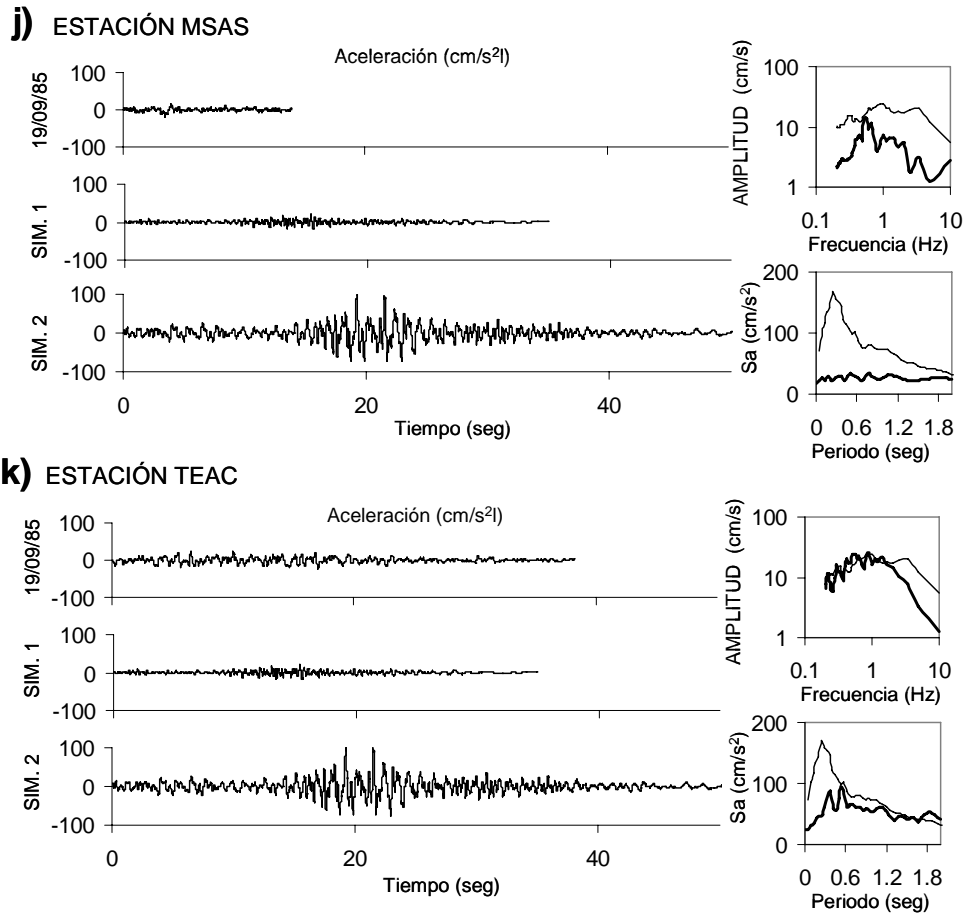


Figura 4.7 (continuación). Historias de aceleración para estaciones (j) MSAS y (k) TEAC, (ver figura 4.2) del evento del 19 de Septiembre de 1985 tomado como el evento objetivo (superior) y dos eventos simulados con el Método 3: Usando funciones de atenuación generalizadas (mitad e inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del esperado con el Método 3 (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-aceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y esperado

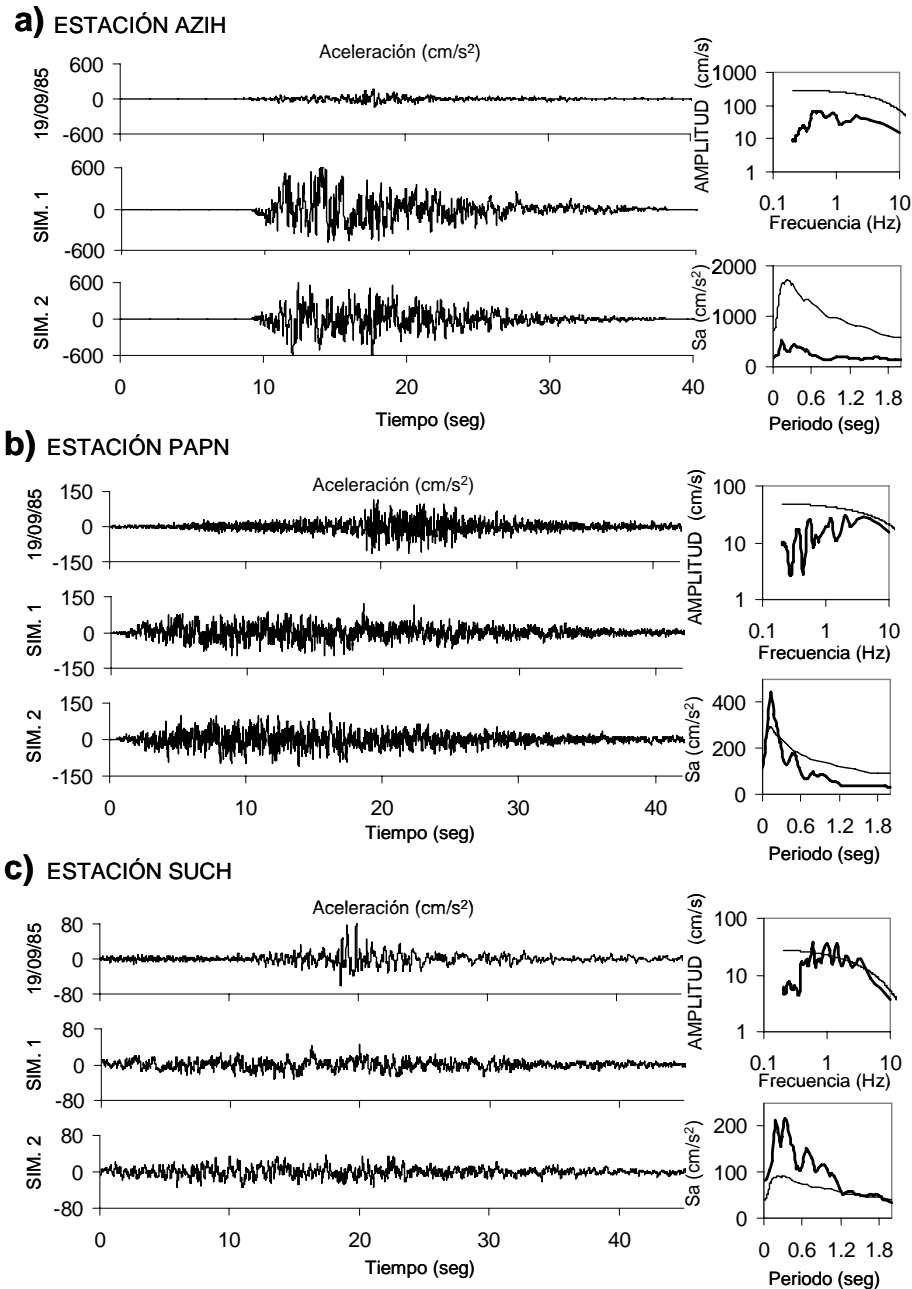


Figura 4.8. Historias de aceleración para estaciones (a) AZIH, (b) PAPN y (c) SUCH, (ver figura 4.2) del evento del 19 de Septiembre de 1985 tomado como el evento objetivo (superior) y dos eventos simulados con el Método 4: método estocástico (mitad e inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del esperado con el Método 4 (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-aceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y esperado

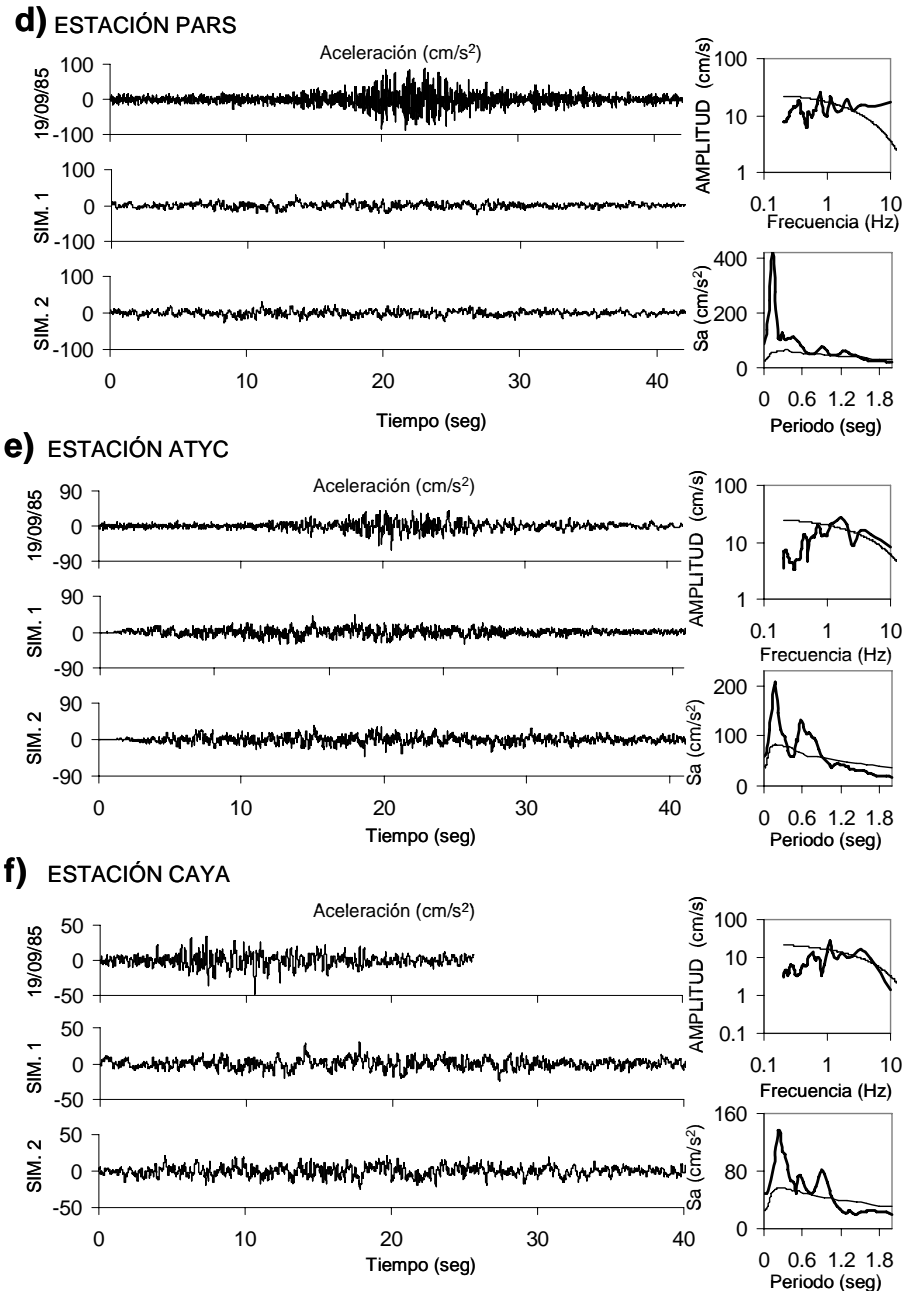


Figura 4.8 (continuación). Historias de aceleración para estaciones (d) PARS, (e) ATYC y (f) CAYA, (ver figura 4.2) del evento del 19 de Septiembre de 1985 tomado como el evento objetivo (superior) y dos eventos simulados con el Método 4: método estocástico (mitad e inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del esperado con el Método 4 (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-acceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y esperado

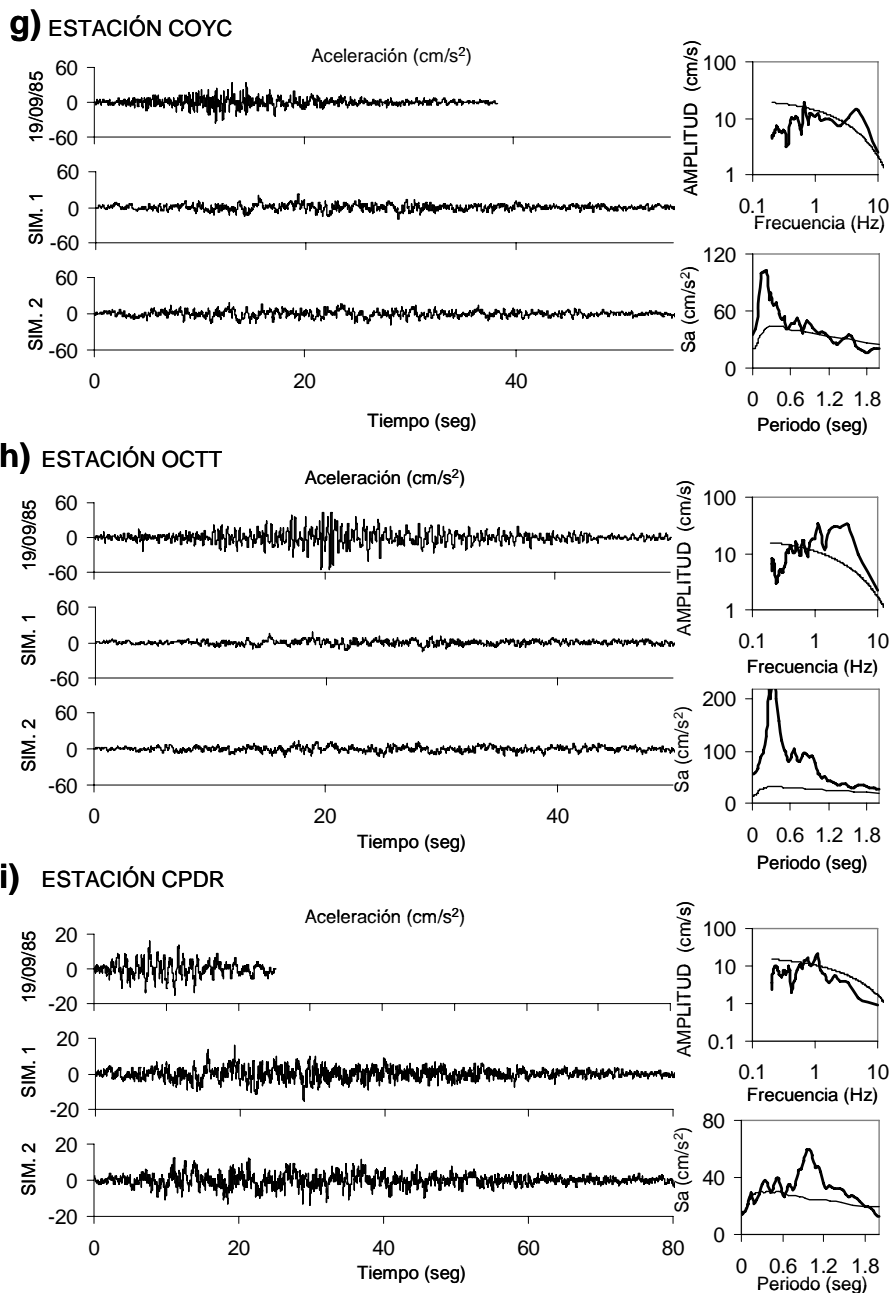


Figura 4.8 (continuación). Historias de aceleración para estaciones (g) COYC, (h) OCTT y (i) CPDR, (ver figura 4.2) del evento del 19 de Septiembre de 1985 tomado como el evento objetivo (superior) y dos eventos simulados con el Método 4: método estocástico (mitad e inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del esperado con el Método 4 (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-aceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y esperado

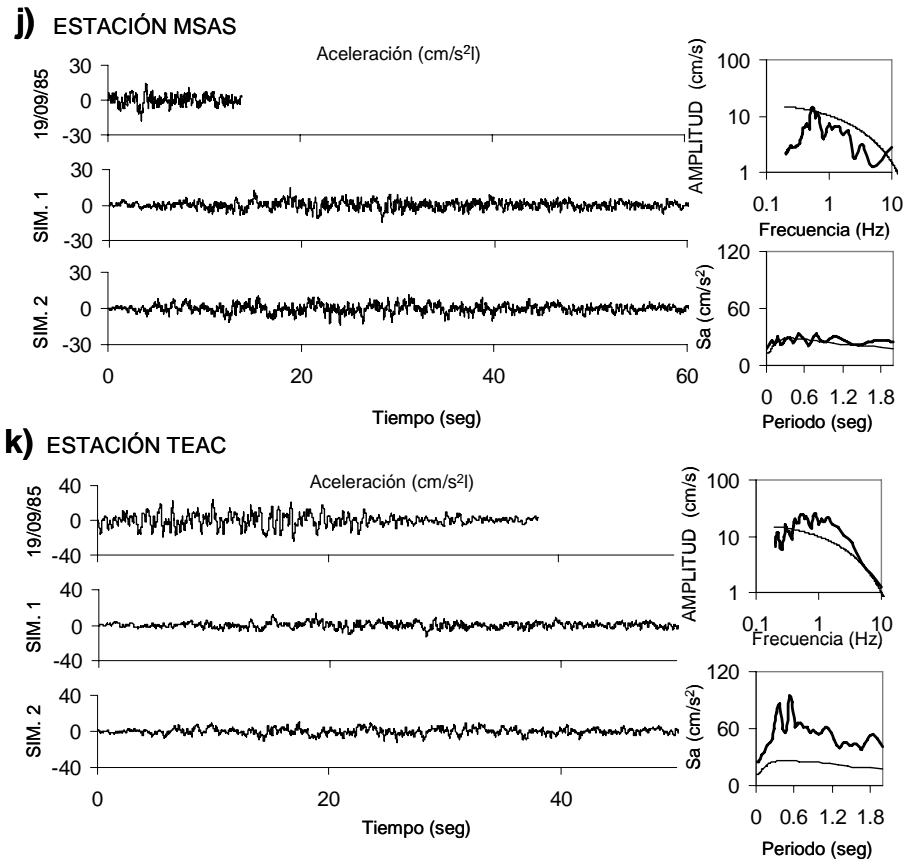


Figura 4.8 (continuación). Historias de aceleración para estaciones (j) MSAS y (k) TEAC, (ver figura 4.2) del evento del 19 de Septiembre de 1985 tomado como el evento objetivo (superior) y dos eventos simulados con el Método 4: método estocástico (mitad e inferior). En el lado derecho, se muestra el espectro de amplitudes de Fourier (superior) del evento objetivo (línea continua) y del esperado con el Método 4 (línea discontinua) y, en la parte inferior, el espectro de respuesta (seudo-aceleración, 5 % amortiguamiento) de los eventos objetivo y esperado

Capítulo 5

Acelerogramas de diseño en sitios afectados por varias fuentes sísmicas: el caso de terreno firme en la Ciudad de México

En este capítulo se propone una metodología para obtener acelerogramas de diseño en sitios afectados por varias fuentes sísmicas. Se usa un sitio en terreno firme de la Ciudad de México como ejemplo. Se recomienda una familia de movimientos sísmicos fuertes para ser usados en la práctica y eventualmente ser incluidos en el código. Los movimientos de diseño se calculan de tres fuentes sísmicas: local, subducción (brecha de Guerrero) y profundidad intermedia (zona centro de México) que representan el mayor peligro sísmico para la Ciudad de México.

5.1 Importancia de los acelerogramas con propósitos de diseño

En algunos casos, especialmente cuando es necesario evaluar la respuesta en el rango inelástico de estructuras importantes, no es suficiente sólo definir el movimiento sísmico en términos de un espectro de diseño que consideran fuerzas relacionadas a parámetros de respuesta máxima como la aceleración espectral y el desplazamiento. Estos parámetros no siempre tienen una correlación directa con pérdida y daño; es más, el daño acumulado o degradación producida por el comportamiento de histéresis debido al movimiento sísmico severo en un solo evento y durante la vida útil de la estructura no puede ser considerado. Eso es por lo que deben usarse acelerogramas en el diseño de estructuras importantes y complejas como las represas, puentes, edificios altos o irregulares, estructuras donde varios modos de vibración pudieran ser importantes y estructuras diseñadas para tener demandas altas de ductilidad.

Estos acelerogramas deben reproducir tan bien como sea posible el movimiento esperado en el sitio. Este movimiento debe tener en cuenta la influencia de parámetros tales como la magnitud, la distancia, el mecanismo de falla y efectos del sitio. Desafortunadamente, los códigos disponibles y manuales son vagos, ellos regularmente solo mencionan que los acelerogramas deben ser compatibles con los espectros de diseño y apropiados a la situación. El criterio implementado por los reglamentos actuales no contiene información suficiente para los ingenieros, por lo que ellos no pueden usar métodos prácticos para generar acelerogramas de diseño, y ellos terminan usando cualquiera que esté disponible y, en muchos casos, poco útil para la estructura específica que ellos están analizando. Más detalles acerca de los diferentes métodos, usuales, para general acelerogramas con propósitos de diseño se incluyen en el capítulo 4 de esta tesis y en las referencias allí contenidas.

Los ingenieros pueden usar cualquiera de los métodos mencionados en el capítulo 4 de la tesis para obtener acelerogramas para analizar sus estructuras, pero ellos deben ser conscientes que cada sitio es afectado por muchas fuentes sísmicas, y por lo tanto se necesitan varios acelerogramas para predecir la respuesta que la estructura tendrá en su vida útil (ver capítulo 1). Es más, es posible esperar movimientos sísmicos diferentes debido a las variaciones e incertidumbres en los parámetros (sismológicos, modelos de simulación y otros). Esta información es incluida en los espectros de peligro uniforme (EPU) que tiene en cuenta la contribución de todas las fuentes sísmicas. Pero este EPU no está disponible para los ingenieros ya que ellos normalmente usan el espectro de diseño, el cual en ciertas ordenadas está sobreestimado; por consiguiente, la forma más práctica es encontrar una familia de acelerogramas que ajuste el EPU y hacerlos disponibles a los ingenieros. Estos acelerogramas

ajustados al EPU están asociados a un peligro sísmico constante; no son acelerogramas para obtener un riesgo sísmico constante.

En lo que sigue, se determinan las fuentes sísmicas principales que producen movimientos de suelo fuerte en un sitio. Se obtiene, usando una técnica de desagregación del peligro sísmico probabilístico (Chapman, 1995), los valores más probables de magnitud y distancia para generar movimientos sísmicos cuyo valor de intensidad (ordenada espectral) se asocia a una tasa de excedencia. Esto permite seleccionar movimientos de suelo que representan los movimientos más probables del peligro sísmico para un parámetro de movimiento y un nivel de peligro dado. Se usa el método de simulación de funciones de Green empíricas (Ordaz *et al.* 1995) modificado por atenuación. También, se propone cómo obtener movimientos apropiados de diseño sísmico, incluyendo un ejemplo, el caso de terreno firme al sur de Ciudad de México, por ser un ejemplo excelente de un lugar afectado por muchas fuentes sísmicas. Más detalles acerca de la aplicación pueden ser obtenida en el apéndice IV y las referencias ahí contenidas

5.2 Metodología propuesta

La metodología consiste en los siguientes pasos:

- 1) Realizar un análisis probabilístico del peligro sísmico incorporando, si es necesario, efectos de sitio lineal o no lineal del sitio, para determinar las fuentes sísmicas que más afectan al sitio.
- 2) Se realiza un análisis de desagregación probabilístico del peligro sísmico, para encontrar la magnitud y distancia que más probabilidad presentan ciertos eventos sísmicos, que genera una intensidad sísmica seleccionada asociada a una tasa de excedencia (inverso del periodo de retorno).
- 3) Para generar los movimientos sísmicos, se debe usar un método de simulación confiable para para el escenario sísmico determinado en el paso 2, que en lo posible considere los efectos de sitio.
- 4) Proponer un número mínimo de movimientos de diseño y para cuáles periodos estructurales deben ser usados para que la respuesta de los movimientos esperados fijen el espectro de peligro uniforme.

Estos acelerogramas obtenidos que se ajustan al espectro de peligro uniforme del sitio, representan los movimientos sísmicos resultado de un análisis de peligro sísmico; por lo tanto se consideran movimientos sísmicos asociados a un peligro sísmico constante, asociados a un periodo de retorno; por lo tanto estos acelerogramas obtenidos no representan movimientos de riesgo sísmico constante. En el final de este capítulo se presenta una discusión acerca de las limitaciones al aplicar la metodología antes mencionada.

5.3 Ejemplo de aplicación. Terreno firme de la Ciudad de México

A continuación se presenta una aplicación al caso de terreno firme de la Ciudad de México de la metodología planteada anteriormente. Por razones de espacio solo explicaremos de forma breve, el ejemplo. Mayores detalles pueden ser obtenidos del apéndice V y las referencias ahí contenidas.

5.3.1 Fuentes sísmicas

Existen varios lugares en el mundo que son afectados por diferentes fuentes sísmicas y varios movimientos sísmicos se deben usar para cubrir todas las posibilidades de movimientos de suelo

fuertes. La Ciudad de México no sólo es uno de más desafiantes ejemplos debido a los muy bien conocidos efectos de sitio sino también porque es afectado por varias fuentes sísmicas diferentes.

El peligro sísmico en Ciudad de México se relaciona a tres fuentes sísmicas: subducción, profundidad intermedia y terremotos continentales o locales. Todos ellos han causado en el pasado pérdidas económicas y fatalidades. La Figura 1 del apéndice IV muestra los límites y ubicación de las principales fuentes sísmicas de subducción y profundidad intermedia; también se muestra, junto con su fecha y magnitud, la ubicación de epicentros de algunos sismos de subducción (rectángulos) y profundidad intermedia (triángulos) usados en este estudio.

El crecimiento de Ciudad de México ha originado un desarrollo urbano importante al sur, donde se han construido recientemente centros comerciales, de negocio, educativos y residenciales y puentes. La estación Ciudad Universitaria (CU) se localiza en esta área y es considerada como el principal sitio de referencia sísmico porque desde 1964 CU ha registrado más de 20 terremotos moderados e intensos ($M > 6.0$). Esto hace a CU la más prolífica estación acelerométrica en el mundo, que permite hacer buenas predicciones del movimiento esperado en la Ciudad de México (ver capítulo 2).

5.3.2 Espectro de peligro uniforme

Para la selección de los movimientos sísmicos de diseño es deseable contar con un análisis probabilístico del peligro sísmico (*Probabilistic Seismic Hazard Assessment*, PSHA) (Cornell, 1968; Esteva, 1970) dada por la ec. (5.1),

$$v(y) = \sum_k w_k \int_{M_o}^{M_u} f_M(m) P(Y > y | m, r) dm \quad (5.1)$$

donde w_k , es la suma de los pesos asignados a las diferentes fuentes sísmicas, k ; M_o y M_u son la magnitud mínima y máxima que se puede generar en la fuente sísmica k , respectivamente; $f_M(m)$ es la función de densidad de probabilidad de la magnitud, $P(Y > y | m, r_{i,j})$ es la función de densidad de probabilidad condicional que la intensidad sísmica, Y , exceda el valor de la intensidad, y , en el sitio.

Esto nos permite obtener la frecuencia con la cual la característica de un sismo (*p.e.* la aceleración máxima del suelo, la duración, la ordenada espectral) es más grande que un valor especificado durante un cierto tiempo. De esta manera, es posible incluir todas las posibles fuentes sísmicas que pueden afectar la zona, tomando en cuenta todas las combinaciones de magnitudes y distancias. La salida de un PSHA es una o más curvas de peligro sísmico que relacionan parámetros del movimiento fuerte para un periodo de retorno en el sitio.

Se calcularon las curvas de peligro sísmico en terreno firme de la Ciudad de México, dadas en términos de tasas de excedencia para pseudo-aceleraciones espectrales, para periodos estructurales entre 0 y 4 seg. Se usaron las fuentes sísmicas previamente mencionadas y tres diferentes leyes de atenuación para calcular el riesgo sísmico con el software de CRISIS 2003: *i*) para los sismos de subducción se usó la relación derivada por Jaimes *et al.* (2006c) que es obtenida utilizando 26 acelerogramas registrados en la estación de CU, *ii*) para los sismos de profundidad intermedia se empleo una ley de atenuación presentada por Montalvo *et al.* (2002), y finalmente, *iii*) para el Cinturón Volcánico Trans-Mexicano se utilizo la relación de Sadigh *et al.* (1997). En el apéndice IV (Figura 2) se muestran las curvas de

peligro sísmico en términos de pseudo-aceleración espectral (5% de amortiguamiento) en CU para dos periodos estructurales ($T=0.2$ y 2 seg). Las figuras corresponden a las fuentes sísmicas siguientes: subducción (líneas continuas delgadas), profundidad intermedia (líneas continuas gruesas), local (líneas discontinuas delgadas) y la contribución total de todas las fuentes sísmicas (líneas grises gruesas). Se puede observar que el peligro sísmico para las estructuras con periodo alrededor de 0.2 seg (ver Fig. 2a del apéndice IV) es dominado por las fuentes de profundidad intermedia (líneas continuas gruesas), y para las estructuras con $T=2$ seg (ver Fig. 2b del apéndice IV) es dominado por fuentes de subducción (líneas continuas delgadas). Eventos de origen local (líneas discontinuas delgadas) también pueden afectar estructuras con periodo corto. Todas estas diferencias también son ratificadas cuando se habla sobre las historias de tiempo.

De las curvas de peligro sísmico es posible obtener el espectro de peligro uniforme (EPU) asociado a una tasa de excedencia (inverso del periodo del retorno). Se construyó el EPU para un periodo de retorno de 125 (línea delgada) y 475 años (línea gruesa) (ver Fig. 3 del apéndice IV). En este EPU hay dos ordenadas máximas que reflejan el peligro sísmico dominadas por dos tipos de fuentes: profundidad intermedia, en $T=0.2$ seg y subducción, en el periodo $T=1$ seg.

El espectro de peligro uniforme es una herramienta bien conocida para obtener el espectro de diseño. El uso del espectro de diseño es una práctica común en ingeniería pero debido a su forma paramétrica algunas de las intensidades sísmicas son sobrestimadas para ciertos periodos estructurales respecto a las obtenidas del EPU (Fig. 3 del apéndice IV). Esto es por lo que se propone en este capítulo que los acelerogramas de diseño deben ajustar el EPU y no las intensidades del espectro de diseño. Sin embargo, se debe reconocer que con esto no se están considerando ciertas incertidumbres que tiene el espectro de diseño (*p.e.* incertidumbre en el periodo de la estructura). El periodo del retorno seleccionado es el usado para obtener el espectro de diseño para el código de diseño de la Ciudad de México (Ordaz *et al.* 2000). Por consiguiente, se asume que tal periodo de retorno da niveles de intensidades que proporcionarán un nivel aceptable de riesgo.

5.3.3 Desagregación probabilística del peligro sísmico

Se aplica un análisis de desagregación probabilística del peligro sísmico (*Disaggregation probabilistic seismic hazard assessment*, DPSHA) para identificar los escenarios sísmicos que contribuyen más significativamente en el peligro sísmico del sitio. Numerosos trabajos pueden ser útiles para obtener una DPSHA (Ishikawa y Kameda, 1988, 1991; McGuire, 1995; Chapman, 1995; Bazurro y Cornell, 1999; Alamilla *et al.* 2001b). Estos trabajos discuten cómo obtener la magnitud y distancia de la fuente sísmica para generar movimientos de diseño. Las propuestas usan una función de probabilidad condicional de la magnitud y la distancia para un nivel de intensidad en el modelo de PSHA. En este trabajo, se calcula la DPSHA mediante el uso de la técnica descrita en Chapman (1995) dada por la ec. (5.2),

$$U(m, r|y)_k = \sum_{k=1}^n \alpha_k \cdot P(Y \geq y|m, r)_k \cdot f_M(m)_k \cdot f_R(r)_k \quad (5.2)$$

donde $U(\bullet)$ es considerada la función de densidad de probabilidad condicional conjunta de M y R para un valor de intensidad, y ; α_k es el número de sismos por unidad de tiempo con magnitud, m , entre los

valores de magnitud mínimo, M_o y máximo, M_u , respectivamente; $P(Y > y | m, r_{i,j})$ y $f_M(m)_k$ han sido previamente definidos; $f_R(r)_k$, es la función de densidad de probabilidad de las distancias.

Con ello, se obtienen las parejas de valores de magnitud y distancia que más frecuentemente ocurren (moda). Con estos valores es posible calcular movimientos de diseño sísmicos de acuerdo a un escenario sísmico realista.

Se obtuvieron las funciones de probabilidad condicional de la magnitud y la distancia para un periodo de retorno de 125 años, y para la aceleración máxima del suelo (*peak ground acceleration*, PGA) y los periodos estructurales de 0.2, 0.5, 1, 2 y 3 seg cuyas intensidades corresponden a 0.53, 1.33, 1.02, 1.27, 1.06 y 0.56 m/s², respectivamente. Estos periodos estructurales fueron seleccionados para ilustrar que periodos estructurales diferentes corresponden a escenarios sísmicos distintos dados en términos de magnitud y distancia. En la Figura 4 del apéndice IV se muestra la función de probabilidad condicional de la magnitud y distancia obtenidas del DPSHA; también se indica los valores modales de la magnitud, M, y distancia, R que presentan la mayor probabilidad de ocurrencia. La magnitud y distancia definen el área sísmica para escoger la FGE apropiada para representar la fuente sísmica de interés: *p.e.* en la Ciudad de México, un movimiento sísmico grande y distante corresponde a una fuente de subducción y un movimiento sísmico grande y menos distante corresponde a una fuente de profundidad intermedia. En la misma figura, se observa que tres funciones de probabilidad de peligro son bi-modales (PGA, T=0.2 y 0.5 seg), reflejando claramente las contribuciones de dos fuentes sísmicas y otras tres uni-modales (T=1, 2 y 3 seg). Se puede apreciar que para T=0.2 y 0.5 seg el peligro sísmico es dominado por sismos de profundidad intermedia (M 7.7, R 160 km) y para T=1, 2 y 3 seg por sismos de subducción (M 7.7, R 263 km). Pero hay claramente otros pares de valores modales para los distintos periodos estructurales que deben tenerse en cuenta para representar propiamente los más probables movimientos sísmicos, como la magnitud 4.8 debido a origen local para periodo corto y una magnitud 7.7 a 160 km, debido a una fuente de profundidad intermedia. Estos eventos contribuyen igualmente al peligro sísmico pero sus movimientos sísmicos se esperan que sean diferentes.

5.3.4 Simulación de movimientos de suelo que ajusten al EPU

Se usan los pares de magnitud y distancia para generar movimientos sísmicos simulados en terreno firme (CU) usando el esquema propuesto en el capítulo 3 cuyas intensidades sísmicas (ordenadas espectrales) son asociadas a un periodo de retorno de 125 años.

Dos registros de CU de muy buena calidad donde se puede observar claramente la llegada de las ondas P y S (Fig. 5 del apéndice IV) se usaron como FGE para obtener los movimientos simulados: 21 de julio de 2000 (profundidad intermedia) y el del 25 de abril de 1989 (subducción). Para el uso de la FGE se requiere el conocimiento de algunos parámetros que caractericen los eventos grandes futuros que son a menudo desconocidos y con grandes incertidumbres que influyen de manera importante en las estimaciones de los movimientos sísmicos. Uno de los parámetros más importantes y menos estudiados es la caída de esfuerzo, $\Delta\sigma$. En el apéndice IV, se muestra qué caídas de esfuerzos fueron empleadas en este trabajo junto con una justificación de por qué se adoptaron los dos registros antes mencionados como FGE. Debido a la variabilidad de tiempos de ruptura (ver apéndice IV) en el modelo de la simulación usado, los movimientos simulados son obtenidos por aproximaciones sucesivas hasta que la ordenada sísmica requerida es alcanzada.

En la Figura 6 del apéndice IV se muestran los acelerogramas simulados con sus valores correspondientes de magnitud y distancia para la aceleración máxima del suelo (*peak ground acceleration*, PGA) y los periodos estructurales de $T=0.2$, 0.5 , 1 , 2 y 3 seg; estos movimientos presentan la apariencia de movimientos sísmicos reales y conservan las características de su fuente como es la amplitud y el contenido de frecuencia. Por ejemplo, los movimientos de profundidad intermedia presentan contenido de frecuencia más alto ($T=0.2$ y 0.5 seg) con respecto a los movimientos de subducción ($T=1$, 2 y 3 seg). En la Figura 6 del apéndice IV también se observa el movimiento sísmico de un sismo tipo local.

Como se explicará el PGA en la Ciudad de México es dominado por un sismo local. Para obtener este movimiento local, se escalo simplemente el PGA del evento del 12 de julio de 1974 ($M=3.5$, tipo local) para dar el nivel requerido de intensidad, debido a que existe poca información con respecto a la caída de esfuerzo y magnitud de este tipo de eventos. Es probable que un sismo local se origine en las antiguas fallas que se formaron en la cuenca; sin embargo, se ignora el origen exacto debido a que la magnitud pequeña de los sismos locales los hace difícil de estudiar. Sin embargo, el evento podría ser obtenido con la técnica de funciones de Green empíricas considerando que las caída de esfuerzo son iguales; sin embargo, nuevamente repito resulta muy incierto como determinar el momento sísmico para este tipo de evento; debido a que un sismo local puede no darse por un proceso sismológico como antes se menciono, sino también por algún derrumbe de alguna caverna subterránea, explosión entre otros. Por lo tanto, es necesario, en un futuro estudiar este tipo de eventos dado su importancia que tienen en el peligro sísmico del valle de México.

Los espectros de respuesta de los acelerogramas simulados fueron calculados y comparados con el EPU para un periodo de retorno de 125 años para ilustrar que cada uno cubre una sección del EPU. En la Figura 7 del apéndice IV se muestra este EPU (líneas gruesas) y los espectros de respuesta de aceleraciones (líneas delgadas) de los registros simulados mostrados en la Figura 6 del apéndice IV. Se puede observar que se estiman bien las ordenadas sísmicas que corresponden a cada uno de los periodos estructurales, pero ellos subestiman para otros periodos estructurales las intensidades sísmicas. Esto es porque tales ordenadas corresponden y deben ser cubiertas a través de otros escenarios sísmicos. También se observa que los espectros de respuesta exceden ligeramente en algunos periodos los valores de las ordenadas del EPU pero esta sobrestimación no resulta significativa para propósitos de diseño con la intención de mantener un nivel de peligro uniforme. Todos estos acelerogramas deben ser considerados para cubrir todas las fuentes sísmicas y movimientos sísmicos posibles.

Se propone encontrar los acelerogramas para ajustar el EPU. Se espera que las estructuras de periodo corto pudieran ser excitadas por un movimiento de profundidad intermedia o un evento local, y estructuras de periodo largo por un movimiento de subducción. En lo que sigue, se propone para cuales periodos estructurales las ordenadas espectrales deben ser calculadas asociadas a un EPU de 125 años. Los diferentes movimientos de diseño propuestos se explican a continuación, y la comparación de los espectros de respuesta se muestra en la Figura 7 del apéndice IV.

Acelerograma I: El primer movimiento sísmico debe ser un sismo local cuyo PGA este asociado al UHS (Fig. 7, del apéndice IV). Este movimiento sísmico no sólo debe usarse para estructura rígidas sino también para el análisis de terraplenes de tierra y laderas.

Acelerograma II: Como se mostró en Figura 3 del apéndice IV, hay un pico en $T 0.2$ seg causado por fuentes de profundidad intermedia (Fig. 7 del apéndice IV).

Acelerograma III: El tercer movimiento sísmico debe seleccionarse de una fuente de profundidad intermedia o de subducción cuya intensidad ajuste la intensidad del periodo estructural de T 0.5seg; esto es porque en este periodo, el peligro sísmico es dominado por ambas fuentes sísmicas. Para una estructura con periodo corto, un sismo de profundidad intermedia debe usarse, y para el caso de una estructura con periodo largo, un sismo de subducción debe seleccionarse.

Acelerograma IV, V y VI: Para periodos estructurales más grande que 1 seg, el peligro sísmico es dominado por fuentes de subducción. Por lo menos tres movimientos sísmicos deben seleccionarse para T=1 y 2 seg y, para estructuras de periodo grande (T>2 seg), otro acelerograma en T=3 seg.

Acelerograma VII: Este movimiento debe corresponder al periodo fundamental de la estructura a ser diseñada. Para el caso de una estructura con periodo corto, un sismo local o de profundidad intermedia debe usarse, y para el caso de una estructura con periodo largo, un sismo de subducción debe seleccionarse. Este acelerograma podrían ser obtenido simplemente modificando el paso de tiempo de uno de los registros anteriores.

5.4 Discusión

En este último capítulo, se presentó una metodología para obtener acelerogramas de diseño en sitios afectados por varias fuentes sísmicas. Se usa el terreno firme del sur de la Ciudad de México, como un ejemplo para aplicar el método. Primero, las fuentes sísmicas principales que más afectan estructuras en el sitio es determinado mediante un análisis de peligro sísmico probabilístico. Segundo, aplicando un método de análisis de la desagregación del de peligro sísmico probabilístico (DPSHA), se encuentra la magnitud y distancia que más probabilidad presentan para generar una intensidad asociada a un periodo del retorno. Tercero, se utiliza un método para generar acelerogramas con propósitos de diseño, para el escenario sísmico determinado. Y, cuarto se sugiere para que periodos estructurales las ordenadas espectrales deben calcularse para ajustar el espectro de peligro uniforme (EPU).

Este último inciso 4º es importante, porque el método considera adecuado, que los acelerogramas propuestos se ajusten al EPU, y con ello se están considerando todas las posibles fuentes sísmicas que afectan al lugar. Dado que por definición, el EPU es el espectro cuyo valor de intensidad para cada una de las distintas frecuencias, incluye todas las posibles combinaciones de fuentes sísmicas que podrían afectar al sitio, y toma en cuenta todas las combinaciones de magnitudes y distancias, asociadas a un periodo de retorno dado; sin embargo, se reconoce que existen limitaciones que más adelante se señalan.

Con esta metodología, se recomienda una familia de movimientos sísmicos fuertes para ser usados en la práctica en terreno firme de la Ciudad de México. Se obtuvo para este sitio que un mínimo de siete acelerogramas de diseño deben usarse para ajustar el EPU. Se indica para qué periodos estructurales las ordenadas espectrales deben calcularse asociadas al EPU. Estos movimientos deben generarse para una ordenada espectral asociada a un periodo del retorno para los periodos siguientes: (I) el primero para un PGA, donde el movimiento debe ser de tipo local; (II) el segundo debe ajustar la intensidad en T 0.2 seg, esto corresponde a una fuente de profundidad intermedia; (III) este movimiento sísmico debe seleccionarse de una fuente de profundidad intermedia o subducción asociado a un periodo estructural de T 0.5 seg; (IV, V y VI) para T=1 ,2 y 3 seg, de una fuente de subducción; y (VII) para el periodo fundamental de la estructura a ser diseñada.

Los acelerogramas obtenidos, con esta metodología, fijando el espectro de peligro uniforme en un sitio, representan los movimientos sísmicos resultado de un análisis de peligro sísmico constante, es decir, asociado a un periodo de retorno; estos acelerogramas obtenidos no representan movimientos sísmicos de riesgo sísmico constante. Por lo que, para obtener estos, se requiere de otro tipo de análisis. Es necesario convertir el análisis de peligro sísmico a análisis de riesgo sísmico. Sería útil un estudio que determine escenarios sísmicos que estén asociados a un nivel de comportamiento estructural (p.e. la distorsión de entrepiso en edificios para dar un nivel de servicio o de colapso) para estructuras representativas o de interés en la región, es decir realizar un análisis probabilístico de la demanda sísmica. Estos métodos basados no solo en las ordenadas espectrales sino en la respuesta estructural no lineal deben ser cuidadosamente calibrados junto con observaciones. Por ejemplo, un análisis de Desagregación Probabilístico de la Demanda Sísmica, daría un escenario de demanda sísmica en términos de magnitud y distancia, para generar movimientos sísmicos representativos para proporcionar un cierto nivel de respuesta estructural. Estos movimientos se deben hacer disponibles a los ingenieros de la práctica. Teniendo en mente que no solo la estructura es importante sino también el contenido mismo que existe dentro de ellas. Por lo que, en un futuro cercano, se requerirá una revisión de las diferentes fuentes sísmicas para dar acelerogramas de diseño los cuales generan un cierto nivel intensidad asociado a un nivel de respuesta estructural.

CONCLUSIONES

Las conclusiones se presentan en la discusión de cada capítulo. Sin embargo, a continuación se incluye un resumen general de las principales conclusiones y contribuciones que se obtuvieron a lo largo de este trabajo.

Capítulo 1

En este trabajo se presentan dos leyes de atenuación para CU, SCT y CD de la Ciudad de México ante sismos de tipo subducción y falla normal. Las leyes de atenuación obtenidas para terreno firme pueden ser utilizadas para predecir espectros respuesta o leyes de atenuación en sitios instrumentados o no instrumentados de acuerdo a lo que se presentó en el capítulo 2.

Además se presentaron las diferencias en la respuesta sísmica de estructuras ubicadas en el valle de México ante dos tipos de eventos: subducción y falla normal. Se muestran diferencias importantes en los espectros de respuesta inelásticos, en la energía de entrada y en la energía histéresis normalizada de 1GDL en periodos cortos ($T < 1.0s$) sobre todo en terreno firme, teniendo mayor intensidad los sismos de falla normal con respecto a los de subducción en estos periodos ante movimientos sísmicos con una misma aceleración máxima del suelo.

Se estudiaron eventos sísmicos registrados en edificios instrumentados tanto en terreno firme como en zona de lago de la ciudad de México. Se encuentra que los modos superiores pueden tener una gran influencia cuando los sismos son de falla normal. Estos modos superiores provocan una mayor intensidad en periodos bajos que afectan a los contenidos en las estructuras y podrían causar daños en pisos superiores.

Las amplificaciones en los pisos superiores con respecto al suelo varían entre 2 y 6, siendo mayores las amplificaciones en estructuras con $T < 1s$ debido a los sismos de falla normal y para estructuras con $T > 1s$ debido a sismos de subducción tanto en terreno firme como en zona de lago. También, es importante considerar el tipo de estructuración del edificio ya que dependiendo de esta la respuesta sísmica cambia de un tipo de sismo a otro; ante sismos de falla normal en periodos mayores de un segundo, las amplificaciones en la azotea son ligeramente mayores para estructuras con deformación a flexión ($\alpha=4$) como son estructuras con muros de concreto con respecto a estructuras que presentan deformación a cortante ($\alpha=10$) como marcos estructurales.

Por lo tanto, el riesgo sísmico de estructuras en sitios del valle de México está prácticamente dominado por los eventos de subducción, sin embargo, de acuerdo a lo mostrado en este trabajo se puede esperar que los sismos de falla normal causen daños en estructuras con periodos estructurales $T < 1.0s$ en terreno firme y en zona de lago en periodos alrededor del segundo modo fundamental del suelo.

También se puede esperar mayores distorsiones en pisos superiores y daños en contenidos de edificios en los diferentes niveles del edificio debido a este tipo de sismos de falla normal, tanto en edificios que tengan periodos estructurales antes mencionados como en periodos mayores a estos debido a los modos superiores. Para fines prácticos, esto es muy importante al utilizar acelerogramas de diseño en la evaluación de la respuesta estructural debido a que no solo se debe contemplar el uso de grandes sismos de subducción sino también considerar los efectos que tienen los sismos de falla normal en la respuesta estructural.

Capítulo 2

Se presentaron cuatro métodos diferentes para obtener espectros de respuesta futuros dados la magnitud y la distancia al área de ruptura basados en datos acelerométricos. Estos métodos han sido usados en varias aplicaciones, por ejemplo, en el cálculo de los espectros de diseño incluidos en el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal que consideran el peligro sísmico en varios sitios. Todos los métodos tienen ventajas y desventajas, y entender y calcular sus errores y las incertidumbres son muy importantes para el uso futuro de ellos.

De los resultados presentados en el capítulo 2, el Método 1, la regresión de Bayesiana directa de espectros de respuesta, es la mejor opción desde que ha mostrado los errores y desviaciones más pequeños. El problema con el Método 1 es que necesita un conjunto amplio de registros (espectros de respuesta) para ser confiable, y éste no es el caso para la mayoría de los sitios. Realmente, es sólo cierto para los sitios presentados en este trabajo (CU, SCT y CD); para cualquier otro sitio el Método 1 no puede aplicarse.

El Método 2 se basa en los espectros de amplitudes de Fourier y el uso de la teoría de vibración aleatorias junto con la duración del movimiento fuerte, un paso que introduce aproximaciones que pueden reducir su confiabilidad. Las desviaciones estándar calculadas para este método son normalmente las más grandes.

Para sitios ubicados en la zona de lago de la Ciudad de México, la falta de datos para la mayoría de los lugares hace que los Métodos 1 y 2 sean casi inútiles. Esto es por lo que los Métodos 3 y 4, los cuales cuentan con datos observados en la estación de referencia (CU), necesitan ser empleados. El Método 3 que está basado en los espectros de respuesta en CU y el uso de cocientes espectrales de respuesta es mejor que el Método 4 donde el uso de la teoría de vibraciones aleatorias y la duración del movimiento de suelo fuerte introducen incertidumbres y errores. Por supuesto, esto es considerando que el comportamiento no lineal no ocurre en el suelo de la Ciudad de México que todavía será confirmado por registros futuros.

Para cualquier evaluación práctica del peligro sísmico en términos de espectros de respuesta uno tiene que calcularlo para un sitio no instrumentado, y la interpolación viene a discusión, especialmente en un lugar como la Ciudad de México con una zona de lago que cambia sus características de respuesta dentro de unas docenas de metros. Éste es el caso del código sísmico o el cálculo de mapas de peligro o riesgo, o cualquier estudio individual del espectro de respuesta del sitio específico. De los resultados presentados en este trabajo está claro que usando el Método 3 para todos los sitios instrumentados e interpolando estos espectros es la mejor manera de obtener los espectros de respuesta en el sitio deseado.

También, se enuncia un método alternativo para la obtención de leyes de atenuación en sitios no instrumentados. Para ello, es necesario contar, solamente, con una ley de atenuación del espectro de respuesta en roca o terreno firme (sitio de referencia) y conocer las propiedades geotécnicas del sitio requerido. Por lo que, en un futuro cercano, este método resultará atractivo, en la práctica, para muchos sitios en donde no se cuenta con registros y se desea realizar un análisis probabilístico del peligro sísmico.

Capítulo 3

En este capítulo, se presentó una expresión para modificar la función de Green empírica por efectos de atenuación. Los cuatro factores son: (1) atenuación geométrica, (2) decaimiento en alta frecuencia, (3) atenuación regional y (4) fases de la señal. Son comparadas las intensidades calculadas mediante el método de simulación con sismos registrados en México de tipo subducción (mecanismo de falla inversa) y de profundidad intermedia (mecanismo de falla normal). Se muestra que el esquema planteado, proporciona una adecuada aproximación entre los movimientos observados y simulados para estaciones localizadas a distancias intermedias y lejanas de la fuente; sin embargo, para estaciones cercanas a la fuente o distancias comparables a las dimensiones de la fuentes, el método pierde precisión debido a los patrones de radiación y heterogeneidades de la fuente, para estos casos otras alternativas deben ser usadas. Posiblemente el método presentado podría considerar los patrones de radiación considerando un modelo que considere el tamaño de la fuente (*p.e.* Método de Hirikura *et al.* 1993). Esto significa, que la función de Green empírica se debe modificar por atenuación para cada celda; y aplicar la técnica de simulación, entonces la señal generada tomaría en cuenta en forma directa los efectos mencionados.

Cabe señalar, que las estimaciones del movimiento del suelo, usando el esquema de simulación propuesto no son libres de incertidumbres. Estas incertidumbres, como es bien conocido, son uno de los factores claves para la estimación del peligro sísmico probabilístico. Dentro del esquema de simulación, se asumió que la atenuación con la distancia es determinística, así como los efectos de sitio, porque estos están implícitamente en el registro usado como función de Green. Sin embargo, la incertidumbre debido a la fuente, debe ser investigada para cuantificar la variabilidad de los parámetros del movimiento del suelo de una simulación a otra, para una caída de esfuerzos dada. Esta cuantificación de la incertidumbre, aún si fuera parcial, podría dar pistas para conocer que porción de la variabilidad podría ser atribuido a detalles del proceso de ruptura.

Capítulo 4

Se presentaron cinco métodos para obtener historias de tiempo de aceleración con propósitos de diseño. Estos métodos han sido usados para evaluar el comportamiento de estructuras, y en el análisis de riesgo sísmico. Todos los métodos tienen ventajas y desventajas, y entender su aplicación y limitaciones es muy importante para el uso futuro de ellos.

De los resultados presentados aquí, el Método 1, escalando acelerogramas existentes de un sitio hasta alcanzar un nivel requerido de intensidad, presenta una buena aproximación con respecto a el evento objetivo en amplitud; sin embargo, no toma en cuenta el cambio respectivo en el contenido de

frecuencia y duración en las historias de aceleración. Esto es importante cuando se desea conocer el daño acumulado o degradación producida por el comportamiento de histéresis. Por otro lado, un sismo de pequeña magnitud tiene una forma espectral diferente a la de un sismo con mayor magnitud; el escalamiento, que se da de manera física, resulta muy diferente. La región sísmica también influye de manera importante en el escalamiento del movimiento sísmico. Cuando, se usan registros provenientes de la misma región sísmica, los resultados son aceptables y es posible obtener intensidades similares a un evento ocurrido en la región. Por otro lado, si se usa un movimiento registrado de una región diferente a uno requerido. Por lo tanto, no es aconsejable usar registros para escalar de otra fuente sísmica que no sea una deseada. Otro problema con el Método 1 es que necesita un registro confiable, y no es el caso para muchos sitios.

El Método 2 usa un procedimiento que envuelve las amplitudes de Fourier de la señal procesada para acoplarse a la correspondiente amplitud del espectro de respuesta de aceleraciones objetivo. Este método usa la teoría de vibraciones aleatorias, junto con una duración del movimiento fuerte, pasos que introducen aproximaciones que reducen su confiabilidad. Aunado a que el Método 2 asume un proceso estacionario, éste genera una señal que no tiene la apariencia de un sismo real. Además, de acuerdo a lo señalado por Naiem y Lew (1995) se sobreestiman las demandas de desplazamiento y la energía de entrada al sujetar una estructura a estos movimientos.

En el Método 3, las intensidades espectrales son semejantes a las observadas; pero al obtener los eventos simulados este método no es capaz de representar señales semejantes a la señal objetivo, debido a las restricciones impuestas en la función moduladora de amplitud y frecuencia.

El Método 4 es ampliamente usado para predecir movimientos de suelo en sitios en los cuales registros de movimientos no son disponibles. Las características esenciales es que toman en cuenta varios factores que afectan al movimiento del suelo (fuente, dirección y sitio) dentro de formas funcionales simples. Por lo tanto, el Método 4 debe ser usado cuando los registros de movimientos no están disponibles. Pero, si existen registros en el lugar, otros métodos se deben usar.

De los resultados presentados en este trabajo, es claro que usar el Método 5 para casi cualquier sitio instrumentado (excepto cerca de la fuente) es la mejor manera para obtener historias de aceleración en un sitio instrumentado. Para sitios no instrumentados, es posible aplicar el Método 5, con ayuda del Método 3 o del Método 4. Con alguno de estos dos métodos se generan movimientos sísmicos, que se consideran como la “semilla”, es decir, la función de Green; a la cual se le aplica la técnica de simulación de funciones de Green y con ello, posteriormente, se obtiene una señal simulada (Kamae *et al.* 1991; Aguirre, 2005).

Capítulo 5

En este capítulo, se presentó una metodología para obtener acelerogramas de diseño en sitios afectados por varias fuentes sísmicas. Se usa el terreno firme del sur de la Ciudad de México, como un ejemplo para aplicar el método. La metodología consistió en: 1) Determinar las fuentes sísmicas principales que más afectan estructuras en el sitio a través de realizar un análisis de peligro sísmico probabilístico, 2) Aplicar un método de análisis de la desagregación del peligro sísmico probabilístico (las siglas en inglés DPSHA) con lo que se encuentra la magnitud y distancia que más probabilidad presentan para generar una intensidad asociada a un periodo del retorno, 3) Utilizar un método para generar

acelerogramas con propósitos de diseño, para el escenario sísmico determinado (ver apéndice III) y 4) Establecer y proponer para qué periodos estructurales las ordenadas espectrales deben calcularse para ajustar el Espectro de Peligro Uniforme (EPU).

Este último inciso 4 es importante, porque el método considera adecuado, que los acelerogramas propuestos se ajusten al EPU, y con ello se están considerando todas las posibles fuentes sísmicas que afectan al lugar. Dado que por definición, el EPU es el espectro cuyo valor de intensidad para cada una de las distintas frecuencias, incluye todas las posibles combinaciones de fuentes sísmicas que podrían afectar al sitio, y toma en cuenta todas las combinaciones de magnitudes y distancias, asociadas a un periodo de retorno dado; sin embargo, se reconoce que existen limitaciones que más adelante se señalan.

Con esta metodología, se recomienda una familia de movimientos sísmicos fuertes para ser usados en la práctica en terreno firme de la Ciudad de México. Se obtuvo para este sitio que un mínimo de siete acelerogramas de diseño deben usarse para ajustar el EPU. Se indica para qué periodos estructurales las ordenadas espectrales deben calcularse asociadas al EPU. Estos movimientos deben generarse para una ordenada espectral asociada a un periodo del retorno para los periodos siguientes: (I) el primero para un PGA, donde el movimiento debe ser de tipo local; (II) el segundo debe ajustar la intensidad en T 0.2 seg, esto corresponde a una fuente de profundidad intermedia; (III) este movimiento sísmico debe seleccionarse de una fuente de profundidad intermedia o subducción asociado a un periodo estructural de T 0.5 seg; (IV, V y VI) para T=1 ,2 y 3 seg, de una fuente de subducción; y (VII) para el periodo fundamental de la estructura a ser diseñada.

Los acelerogramas obtenidos, con esta metodología, fijando el espectro de peligro uniforme en un sitio, representan los movimientos sísmicos resultado de un análisis de peligro sísmico constante, es decir, asociado a un periodo de retorno; estos acelerogramas obtenidos no representan movimientos sísmicos de riesgo sísmico constante. Por lo que, para obtener estos, se requiere de otro tipo de análisis. Es necesario convertir el análisis de peligro sísmico a análisis de riesgo sísmico. Sería útil un estudio que determine escenarios sísmicos que estén asociados a un nivel de comportamiento estructural (*p.e.* la distorsión de entrepiso en edificios para dar un nivel de servicio o de colapso) para estructuras representativas o de interés en la región, es decir realizar un análisis probabilístico de la demanda sísmica. Estos métodos basados no solo en las ordenadas espectrales sino en la respuesta estructural no lineal deben ser cuidadosamente calibrados junto con observaciones. Por ejemplo, un análisis de Desagregación Probabilístico de la Demanda Sísmica, daría un escenario de demanda sísmica en términos de magnitud y distancia, para generar movimientos sísmicos representativos para proporcionar un cierto nivel de respuesta estructural. Estos movimientos se deben hacer disponibles a los ingenieros de la práctica. Teniendo en mente que no solo la estructura es importante sino también el contenido mismo que existe dentro de ellas. Por lo que, en un futuro cercano, se requerirá una revisión de las diferentes fuentes sísmicas para dar acelerogramas de diseño los cuales generan un cierto nivel intensidad asociado a un nivel de respuesta estructural.

REFERENCIAS

- Abrahamson, N.A. y Silva, W.J. Empirical response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes, *Seism. Res. Let.*, **68**, 94-127.
- Aguirre, J. (2005). Escenarios sísmicos a través de la caracterización de las fuentes sísmicas en México, *XV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*.
- Alamilla, J., Esteva, L., García P. J. y Díaz L., O. (2001a). Evolutionary properties of stochastic models of earthquakes accelerograms: Their dependence on magnitude and distance, *Journal of Seismology*, **5**, 1-21.
- Alamilla, J., Esteva, L., García P. J. y Díaz L., O. (2001b). Simulating earthquake ground motion at a site, for given intensity and uncertain source location, *Journal of Seismology*, **5**, 475-485.
- Atkinson, G. M. (2006). Single-Station Sigma, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **96**, 446-455.
- Baker, J.W., Cornell, C.A., y Tothong, P. (2005). Disaggregation of seismic drift hazard. *Proceedings, 9th International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR05)*, Rome, Italy.
- Bazzurro P. y Cornell C. (1999). Disaggregation of seismic hazard, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **89**, 501-520.
- Boatwright, J. (1988). The seismic radiation from composite models of faultings, *Bull. Seism. Soc. Am.* **78**, 489-508.
- Bommer, J.J., Scout S.G. y Sarma S. K. (1998). Time-history representation of seismic hazard," *11th European Conference on Earthquake Engineering*, Balkema, Rotterdam.
- Bommer, J.J., Scott S.G. y Sarma S.K. (2000). Hazard-consistent earthquake scenarios, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **19**, 219-231.
- Boore, D. G. (1983). Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **73**, 1865-1894.
- Boore, D. G. (2003). Simulation of ground motion using the stochastic method, *Pure and Applied Geophysics.*, **160**, 635-676.
- Bour, M. y Cara M. (1997). Test of a simple empirical Green's function method on moderate-sized earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.* **87**, 668-683.

- Cartwright, D. y Longuet-Higgins, M. (1956). The statistical distribution of the maxima of a random function. *Proceedings of the Royal Society of London*, **A 237**, 212-232
- Chapman, M. (1995). A probabilistic approach to ground-motion selection for engineering design. *Bull. Seism. Soc. Am.* **85**, 937-942.
- Chan, S., Ruiz S. y Montiel, M. (2005). Escalamiento de acelerogramas y mínimo número de registros requeridos para el análisis de estructuras, *Revista de Ingeniería Sísmica*, **7**, 1-24.
- Cornell, C.A. (1968). Engineering seismic risk análisis, *Bull. Seism. Soc. Ame.*, **58**, 1583-1606.
- Esteva, L. (1970). Regionalización sísmica de México para fines de ingeniería, *Series del Instituto de Ingeniería*; 246.
- Furumura, T. y Singh. S.K. (2002). Regional wave propagation from Mexican subduction zone earthquakes: The attenuation functions for interplate and inslab events, *Bull. Seism. Soc. Am.* **92**, 2210-2125.
- García, D. Singh S.K., Herráiz M., Pacheco J.F. y Ordaz M. (2004). Inslab earthquakes of Central Mexico: Q, source spectra and stress Drop, *Bull. Seism. Soc. Am.* **94**, 3.
- Hartzell, S. (1978). Earthquake aftershocks as Green's functions, *Geophys. Res. Lett.*, **5**, 1-4.
- Hartzell, S., Harmsen, S., Frankel A. y Larsen S. (1999). Calculation of broadband time histories of ground motion; comparison of methods and validation using ground motion from the 1994 Northridge earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.* **89**, 1484-1504.
- Hartzell, S., Guatteri, M., Mai M. M., Liu P. C. y Fisk M. (2005). Calculation of broadband time histories of ground motion, part II: kinematic and dynamic modeling using theoretical Green's function and comparison with the 1994 Northridge earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.* **95**, 614-645.
- Heuze, F., Ueng, T., Hutchings L., Jarpe P. y Kasameyer (1997). A coupled seismic-geotechnical approach to site-specific strong motion, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **16**, 259-272.
- Hutchings, L. (1991). Prediction of strong ground motion for the 1989 Loma Prieta earthquake using empirical Green's functions, *Bull. Seism. Soc. Am.* **81**, 1813-1837.
- Hutchings, L. (1994a). Kinematic earthquake models and synthesized ground motion using empirical Green's functions, *Bull. Seism. Soc. Am.* **84**, 1028-1050
- Hutchings, L. (1994b). Earthquake models and synthesized ground motion for the 1971 San Fernando earthquake and aftershocks using empirical Green's functions, *Bull. Seism. Soc. Am.* **84**, 1028-1050.
- Hutchings, L., Jarpe, S.P., Kasameyer, P.W. y Foxall W. (1996). Synthetic strong ground motions for engineering design utilizing empirical Green's functions, *Eleven World conference of earthquake Engineering, Acapulco*, June 23-28.

- Ishikawa, Y. y Kameda, H. (1988). Hazard-consistent magnitude and distance for extended seismic risk analysis, *Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, **II**, 89-94.
- Ishikawa, Y. y Kameda, H. (1991). Probabilty-based determination of specific scenario earthquake. *Proceedings of Four International Conference of Seismic Zonation*, **II**, 3-10.
- Irikura, K. (1983). Semi-empirical estimation of ground motion during large earthquakes, *Bull. Disaster. Prevention. Inst.*, Kyoto Univ. **33**, 63-104.
- Jarpe, S. P. y Kasameyer, P. W. (1996). Validation of procedure for calculating broadband strong-motion time histories with empirical Green's functions, *Bull Seism. Soc. Am.* **86**, 1116-1129.
- Jaimes, M. A. y Reinoso, E. (2006a). Comparación del comportamiento de edificios en el valle de México ante sismos de subducción y falla normal. Aceptado para su publicación en la *Revista de Ingeniería Sísmica*
- Jaimes, M.A., Reinoso E., y Ordaz M. (2006b). Empirical Green's functions modified by attenuation for sources located at intermediate and far distances from the original source. Aceptado para su publicación en el *Journal of Earthquake Engineering*.
- Jaimes, M.A., Reinoso E., y Ordaz M. (2006c). Comparison of methods to predict response spectra at instrumented sites given the magnitude and distance of an earthquake, Aceptado para su publicación en el *Journal of Earthquake Engineering*.
- Joyner, W. B. y Boore, D. M. (1986). On simulation large earthquakes by Green's functions addition of smaller earthquakes, in *Earthquake Source Mechanics*, (Maurice Ewing series 6), s. Das, J. Boatwright and C. H. Sholtz (Editors), American Geophysical Monograph 37, Washington, D.C., 269-274.
- Joyner, W. y Boore, D. (1993). Methods for regression analysis of strong-motion data", *Bull. Seism. Soc. Am.* **83**, 469-487.
- Kanamori, H., Jennings, P.C., Singh S.K. y L. Astiz (1993). Estimation of strong ground motions in Mexico City expected for large earthquakes in the Guerrero seismic gap. *Bull. Seism. Soc. Am.* **83**, 811-829.
- Kamae, K., Irikura K. y Fukuchi Y. (1991). Prediction of strong ground motion using a semi-empirical technique. *11th SMIRT*, Tokyo, 45-50.
- Kamae K., Irikura K. y Pitarka A. (1998). A technique for simulating strong ground motion using hybrid Green's function, *Bull. Seism. Soc. Am.* **88**, 357-367.
- McGuire. (1995). Probabilistic seismic hazard analysis and design earthquakes: closing the loop. *Bull. Seism. Soc. Ame.*, **85**, 1275-1284.
- Miranda, E. y Taghavi, S. (2005). Approximate floor acceleration demands in multi-story buildings. I: *Formulation. Journal of Structural Engineering, ASCE*, **131**, No.2, 203-211.

- Montalvo-Arrieta, Reinoso, E., J. C., Sánchez-Sesma, F., Singh S.K., Pacheco, J. y Ordaz M. (2002). The seismic response of the hill zone in Mexico City: A review and new findings. Enviado para su revision y publicación en el *Bull. Seism. Soc. Ame.*
- Naeim F. y Lew M. (1995). On the use of the design spectrum compatible time histories. *Earthquake Spectra*; **11**, 111-127.
- Nojima, N. y Kameda, H. (1988). Simulation of risk-consistent earthquake motion. *Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, **II**, 95-100.
- Nozu, A. and Morikawa, H. (2004). Assessment of soil nonlinearity using empirical Green's function method, *13th World Conf. on Earth. Eng.* Vancouver, Canada, 1-6.
- Ordaz, M., Arboleda, J. y Singh, S.K. (1995). A scheme of random summation of an empirical Green's function to estimate ground motions from future large earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.* **85**, 1635-1647.
- Ordaz M, Miranda, E. y Avilés J. (2000). Propuesta de espectros de diseño para el DF. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural.
- Pavón R. V. y Rodríguez N. C. (1990). Instrumentación sísmica y uso de elementos disipadores de energía en el comportamiento estructural, *Seminario Internacional, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica.*
- Papageorgiou, A.S. y Aki, K. (1983). A specific barrier model for the quantitative description of inhomogeneous faulting and the prediction of strong ground motion I. Description of the model. *Bull. Seism. Soc. Am.* **73**, 693-722.
- Pérez, A., Jaimes, M.A. y Ordaz, M. (2007). Spectral attenuation relations at soft sites based on existing attenuation relations for rock sites Enviado para su publicación al *Journal of Earthquake Engineering.*
- Reyes, C. (1999). El estado límite de servicio en el diseño sísmico de edificios. *Tesis de doctorado*, UNAM, México
- Reinoso, E., Pérez-Rocha, L., Ordaz, M. y Arciniega, A. (1992). Prediction of response spectra at any site in Mexico City. *Proceedings of the Tenth World Conference of Earthquake Engineering*, 767-772.
- Reinoso, E. y Ordaz, M. (1999). Spectral Ratios for Mexico City from Free-Field Recordings. *Earthquake Spectra*, **15**, 273-295.
- Rosenblueth, E. y Arciniega, A. (1992). Response spectral ratios. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **21**, 483-492.
- Sadigh, K. (1997). Attenuation relationships for shallow crustal earthquakes based on California strong motion data. *Seism. Res. Let.*, 68, 1, 180-189.

-
- Singh, S. K., Mena, E., y Castro, R. (1988). Some aspects of source characteristics and the ground motions amplifications and near Mexico City from the acceleration data of the September, 1985, Michoacán, Mexico earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **78**, 451-477.
- Singh S. K. (2003). Advances in seismology with impact on earthquake engineering. *XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Conferencia Magistral, León, Gto.
- Somerville, P., Smith, N. y Graves R. (1997). Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity. *Seism. Res. Letters*, **68**, 199-222.
- Shome N., Cornell, C.A., Bazurro, P. y Carballo, J.E. (1998). Earthquakes, records and nonlinear responses. *Earthquake Spectra*, 14, 3, 469-500.
- Shome, N. and Cornell, C.A. (1999). Probabilistic seismic demand analysis of non-linear structures. *Report No. RMS-35*, RMS Program Stanford University, Stanford
- Tumarkin, A.G., Archuleta, R.J. y Madariaga, R. (1994). Scaling relations for composite earthquake models. *Bull. Seism. Soc. Am.* 84, 1279-1283.
- Wennerberg, L. (1990). Stochastic summation of empirical Green's functions, *Bull. Seism. Soc. Am.* **80**, 1418-1432.
- Zeng, Y., Anderson, J. G. y Yu, G. (1994). A composite source model for computing realistic synthetic ground motions, *Geophys. Res. Lett.* **21-8**, 725-728.