

1161
13



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

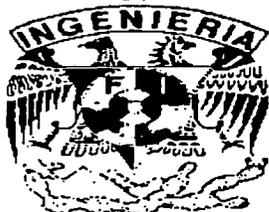
**DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
DE LA FACULTAD DE INGENIERIA**

**"RIESGO SÍSMICO EN EL VALLE DE MÉXICO
PARA VARIOS PERIODOS DE RETORNO
DEBIDO A SISMOS DE SUBDUCCION Y
DE FALLA NORMAL"**

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

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

DIRECTOR: DR. EDUARDO REINOSO ANGULO



CIUDAD UNIVERSITARIA, NOVIEMBRE 2002



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Dedicatoria

A Dios,
Quien me dio la oportunidad de existir y pensar nuevamente

A mi madre, Petra Téllez Lagunas por seguir dándome amor y apoyo

A mi padre, Pastor Jaimes Nuñez por el amor y seguir enseñándome con el ejemplo

A mi abuelo, Emiliano Téllez Lagunas, por los consejos que aun siguen más vigentes que ayer. In memoriam

A mis hermanos con profundo agradecimiento

A mis amigos(as) con los que cuento siempre aún cuando no los veo casi nunca

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México, a la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería y a mis profesores que contribuyeron a lograr mi objetivo, y por darme la oportunidad de recibir nuevos conocimientos para continuar con mi formación académica y profesional.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo proporcionado por dos años de estudio.

Al Instituto de Ingeniería que me apoyó para terminar con este trabajo

A mi tutor y director de tesis: Dr. Eduardo Reinoso Angulo, a quien agradezco enormemente el tiempo, la paciencia y la asesoría brindada para la realización de este trabajo.

A el Dr. Mario Ordaz Schroeder, Dra. Sonia E. Ruiz Gómez, Dr. Jaime García y Dr. Carlos Reyes por la revisión crítica de este trabajo.

A mis compañeros de maestría. Gracias por la amistad brindada.

CONTENIDO

Introducción	i
1. Sismicidad en México	1
1.1 Sismos de subducción	2
1.2 Sismos de falla normal	3
1.3 Sismos de intraplaca	5
2. Movimiento sísmico en el Valle de México en terreno firme	13
2.1 Características del valle	13
2.2 Movimiento observado desde el epicentro hasta la Ciudad de México	15
2.3 Movimiento en sitios de Lomas	15
2.3.1 Espectros de Fourier tomando en cuenta zonas sismogénicas	15
2.3.2 Espectros de Fourier sin considerar zonas sismogénicas	23
2.3.3 Promedio de espectros de Fourier de subducción y falla normal	24
2.3.4 Promedio de espectros de respuesta de subducción y falla normal	28
2.4 Desplazamiento del suelo en el valle de México	31
3. Amplificación en el valle de México debido a sismos de subducción y de falla normal	33
3.1 Cocientes espectrales de zona de lago con respecto a la de lomas	33
3.2 Cálculo de cocientes de respuesta con respecto a CU	55
3.3 Mapas de igual amplificación para sismos de subducción y falla normal	59
4. Escenarios de riesgo sísmico en la ciudad de México debido a sismos de falla normal y subducción	66
4.1 Método de simulación propuesto por Ordaz <i>et al.</i> (1995)	66
4.2 Movimientos futuros calculados por medio de funciones de Green	67
4.3 Simulación de acelerogramas y espectros de respuesta para CU debidos a sismos de falla normal y subducción	69
4.4 Simulación de espectros debido a sismos de falla normal y subducción	76

5. Espectros de aceleración en la ciudad de México para distintos periodos de retorno	81
5.1 Espectros de aceleraciones en CU registrados durante 37 años	81
5.2 Espectros de peligro uniforme en CU	83
5.3 Espectros de peligro uniforme en otras estaciones de la ciudad de México	87
5.4 Aceleraciones en algunos edificios para que se presente una distorsión límite de servicio	91
5.4.1 Determinación de la aceleración de servicio en edificios instrumentados	91
5.5 Mapas de igual aceleración para diferentes periodos de retorno	98
5.6 Espectros de diseño propuestos para periodos de retorno menores de 20 años	103
Conclusiones	109
Referencias	112

RESUMEN

En este trabajo se presenta una breve descripción sobre el origen de temblores de subducción, falla normal e intraplaca en el país. Se incluyen algunos resultados que abarcan temas como trayectoria, movimiento y contenido de frecuencias en terreno firme y amplificación en la zona de lago. También, se muestra una comparación de las características dinámicas en el valle de México ante dos eventos de falla normal.

Se utilizan los registros de aceleración para obtener espectros de Fourier y espectros de respuesta en diversas estaciones y los respectivos cocientes espectrales de la zona de lago y transición del valle de México debido a sismos de subducción y falla normal, así como los correspondientes mapas de curvas de igual amplificación para cuatro diferentes periodos estructurales ($T=1.5, 2, 3$ y 5 segundos) en los que se muestran una relación entre las curvas de mayor amplificación y las zonas donde se han reportado daños durante sismos recientes.

Se realizan diferentes simulaciones en Ciudad Universitaria debido a sismos de falla normal y subducción obtenidos por medio de funciones de Green empírica (Ordaz *et al.* 1998) para un periodo de retorno de 125 años, y a través de los cocientes espectrales se obtienen diferentes espectros de aceleraciones en algunos sitios de la Ciudad de México debido a estos eventos. Estos se comparan con los espectros elásticos de diseño que establecen las nuevas Normas Técnicas Complementarias Sísmicas (2001). Se comentan los resultados para algunas zonas del valle de México donde se espera mayor daño ante eventos de subducción y falla normal.

Finalmente se presentan mapas con curvas de igual aceleración para diferentes periodos de retorno ($T_R=10, 20$ y 125 años) y diferentes periodos estructurales ($T=0.5, 1, 1.5, 2, 3$ y 5 segundos). Para estas curvas con periodo de retorno de 10 y 20 años se hace una correlación entre la distorsión de servicio indicada por el nuevo reglamento de sismos y la aceleración obtenida de un método propuesto de edificios instrumentados en la Ciudad de México. Para la curva con periodo de retorno de 125 años se hace una correlación con los daños ocasionados por el sismo de 1985. Se proponen algunos valores de espectros de diseño para diferentes periodos de retorno ($T_R=10, 15$ y 20 años) considerando un amortiguamiento del 5 por ciento.

INTRODUCCIÓN

Gran parte de los terremotos son fenómenos en los que enormes cantidades de energía acumulada en las zonas de interacción asociadas a fallas (inversa, normal, etc) entre placas tectónicas durante décadas se liberan en periodos muy cortos de tiempo. Estos son los eventos sísmicos más estudiados por la gran probabilidad de que pueda ocurrir en un futuro no lejano un evento sísmico que podría superar lo que se sufrió en la ciudad de México en 1985. En este evento se originaron miles de muertos y heridos, y pérdidas económicas enormes para el país. Pero también se impulsaron grandes estudios y avances en el conocimiento sobre estos fenómenos con lo cual hoy sabemos en qué consisten y cuáles son los mecanismos que los producen y el potencial destructivo que implica.

Sin embargo, también a lo largo de la historia se han presentado algunos terremotos al interior del país que liberan energía pero no por interacción entre placas sino asociados a un mecanismo de falla normal. Estos en algunas ocasiones han provocado no solamente daños estructurales y por consiguiente económicos, sino también la pérdida de vidas humanas.

No obstante, a pesar de los avances de la ciencia, todavía se tienen incertidumbres sobre estos fenómenos, como los efectos y diferencias en los movimientos en las estructuras de la ciudad de México y de amplificación, si el evento es de un determinado tipo, si proviene del interior o de una brecha sísmica diferente, la importancia de los efectos del azimut, en qué zonas del valle de México podemos esperar más daños ante un sismo de cierta intensidad, entre otros. Son muchas las preguntas y pocas las respuestas.

En el capítulo 1 se describen tres de las diferentes fuentes que más afectan a la ciudad de México, que son los sismos de subducción, falla normal e intraplaca, y se pone mayor énfasis en los sismos de origen de falla normal por estar menos estudiados. Pero como se observará durante el trabajo, pueden ser muy intensos para ciertos lugares y estructuras del valle de México.

En el capítulo 2 se describe de manera breve cómo las ondas sísmicas de un sismo de falla normal se transmiten en el país y llegan desde el epicentro a la ciudad de México. Además se analizan los espectros de amplitudes de Fourier generados por las diversas brechas sísmicas que existen en el país, y se comparan con los espectros generados por sismos de falla normal, todo esto para un sitio en Ciudad Universitaria. Por último se presentan los desplazamientos del terreno provocado por dos sismos de falla normal para señalar la importancia que tienen la topografía y características del valle en la amplificación y duración del movimiento.

En la capítulo 3 se muestran las diferencias entre la amplificación de los sismos de falla normal y subducción. Esto se realizará analizando los cocientes espectrales obtenidos a partir de relación entre los promedios de espectros de amplitudes de Fourier en zona de lomas y los espectros en 66 sitios del valle de México. También con ayuda de los promedios de los espectros de respuesta (ER) en zona de lomas y los ER en los 66 sitios de la ciudad de México se analiza si existen diferencias entre un sismo y otro en los efectos de amplificación. Por último se observará para algunas estaciones del valle de México si existen diferencias entre tomar exclusivamente el cociente espectral en CU y el promedio de zona de lomas.

En el capítulo 4 se estiman movimientos futuros del terreno en el valle de México que resultarían de la ocurrencia de sismos de falla normal y de subducción hipotéticos de diferentes magnitudes pero con un periodo de recurrencia de 125 años, a partir de acelerogramas registrados. El método de simulación que se emplea es el propuesto por Ordaz *et al.* (1993), el cual utiliza registros de aceleración como funciones de Green empíricas. Con los resultados que se obtienen de la ayuda de esta técnica se pueden vislumbrar algunos ejemplos de cuáles fueron y podrían ser los escenarios de peligro en el valle de México. Con ello, se puede conocer en qué forma afectarían a los espectros de diseño que están marcados en las nuevas normas técnicas complementarias de sismos (NTCS-2001).

Por último en el capítulo 5 se generan espectros de aceleraciones para diversos periodos de retorno para el valle de México utilizando el procedimiento de Ordaz *et al.* (2000). Esto se hace no sólo para un sismo de gran intensidad (periodo de retorno de 125 años) para proteger a la estructura del colapso, sino también ante sismos de menor intensidad que ocurren con mayor frecuencia (periodos de retorno menores de 30 años), con el fin de evitar daño tanto en los elementos no estructurales como estructurales. Finalmente se proponen los espectros de diseño para diferentes periodos de retorno ($T_R=10, 15$ y 20 años).

Capítulo 1

Sismicidad en México

Nuestro país se encuentra en una región del planeta intensamente afectada por los sismos. Esto obedece a que las placas de Cocos y de Rivera, que se encuentran al sur y sureste de México, en el océano Pacífico, se meten por debajo de la placa de Norteamérica. Es en esta zona costera donde se acumulan grandes cantidades de energía que al liberarse provocan los sismos que afectan a nuestro país, principalmente sismos de subducción. El movimiento relativo entre estas placas ocasiona uno de los peligros sísmicos y volcánicos más altos del mundo. Para el país y la ciudad de México, los sismos representan la causa del mayor número de fallas y daños en las estructuras.

En la figura 1.1 se muestran las zonas de ruptura de algunos de los sismos más significativos que han ocurrido durante los últimos 16 años, las zonas de ruptura de los grandes sismos alcanzan hasta 200 km. También en la figura 1.1 se aprecian sismos al interior del continente en regiones alejadas de estas fronteras tectónicas, principalmente a lo largo de la faja volcánica (sismos de falla normal e intraplaca), donde se concentra una gran cantidad de la población de México.

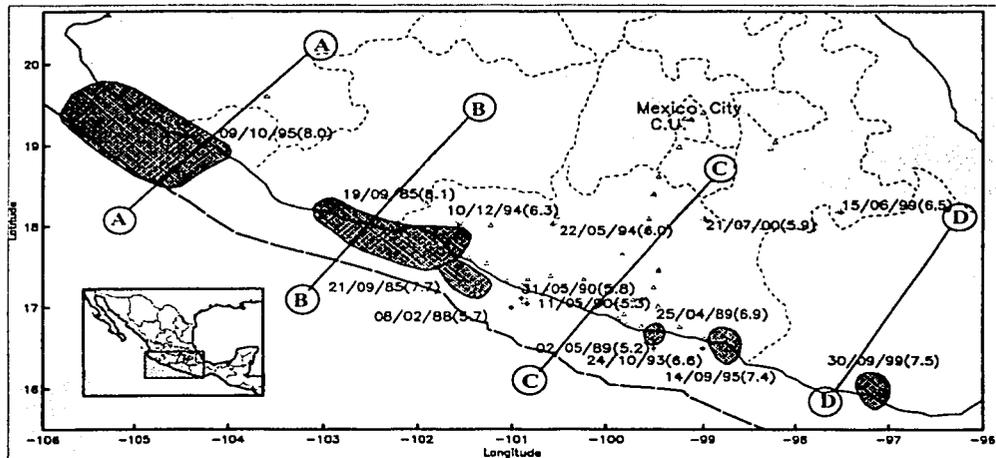


Figura 1.1 Zonas de ruptura de los grandes sismos durante los últimos 16 años

El país tiene 10 estados que históricamente se han caracterizado por su actividad sísmica: Nayarit, Jalisco, Colima, Michoacán, Veracruz, Estado de México, Puebla, Guerrero, Oaxaca y Chiapas. Pero el hecho de que se encuentre mayor cantidad de información en determinados estados se deriva de dos factores; en primer lugar depende tanto del momento en que se llevó a cabo el poblamiento en cada uno de ellos, así como de la densidad de población alcanzada en los diferentes momentos históricos: en segundo lugar, depende del riesgo sísmico diferencial que se registra en las diversas regiones que

conforman nuestro extenso país. En este sentido, y como era de esperarse, aquellos que aún en la actualidad registran una mayor actividad sísmica son los que cubren un mayor número de años. Estos son en forma decreciente, los siguientes: Distrito Federal, Oaxaca, Guerrero, Michoacán, Jalisco, Colima, Puebla, Veracruz, Tlaxcala y Chiapas.

Como se ha visto el país está afectado por sismos de subducción, falla normal e intraplaca, cada uno con diferentes características de movimiento (capítulo 2). En el presente capítulo se mencionan de manera breve algunas particularidades de los tres grupos de sismos. Pero a lo largo de todo este trabajo se estudian con mayor énfasis los sismos de origen de falla normal por dos razones principales: en primera debido a que hasta hace poco se cuenta con datos confiables de este tipo de sismos (Tabla 2.1) y en segunda porque es de gran interés conocer más sobre la forma en que se transmiten las ondas (capítulo 2), qué efectos provocan (capítulo 3), y qué se puede esperar en el futuro debido a este tipo de eventos (capítulo 4) principalmente en la ciudad de México. Este tipo de sismos de falla normal se compara con sismos de origen de subducción que han sido los eventos más estudiados. Con los sismos de intraplaca no se realizó lo mismo debido a la insuficiencia de información con que se cuenta en la actualidad.

1.1 Sismos de subducción

Los sismos de subducción presentan mecanismos del tipo de falla inversa debido a la liberación de energía acumulada entre las zonas de interacción (placas tectónicas) a lo largo de los límites convergentes de las mismas. En México ocurren entre la placa de Rivera y la placa de Norteamérica, entre la placa de Cocos y la de Norteamérica que abarca la mayor parte de la costa del Pacífico, y en el límite entre la placa de Cocos y la placa del Caribe al sureste de México.

Algunos segmentos de la zona de subducción tienen periodos de recurrencia de 30 a 40 años para sismos de magnitud 7.5 ó mayor. Estos tiempos de recurrencia son relativamente cortos comparados con otras zonas de subducción en el mundo. Estos sismos no sólo se producen con mayor frecuencia, sino también son los más registrados en México, que por su cercanía representan un grave peligro en las costas a las poblaciones allí localizados. También son los que causan movimientos más violentos en el valle de México, particularmente porque el tipo de ondas que llegan son ricas en periodos largos que sufren menos atenuación y experimentan una gran amplificación al atravesar las arcillas del lago (capítulos 2 y 3).

Como se puede observar en la figura 1.1, existen dos brechas, una frente a las costas de Colima-Michoacán, y otra frente al istmo de Tehuantepec, de la que no se tiene información de la ocurrencia de un gran sismo en el pasado. Es posible que estas zonas sean asísmicas, es decir, que la energía acumulada no se ha libere a través de grandes sismos.

Aunque de ningún fenómeno se puede tener la certeza absoluta de cuándo va a ocurrir, estudios sismológicos de la región entre Acapulco y Zihuatanejo, indican que puede ocurrir un sismo con Magnitud 8 (capítulo 4), cuyos efectos podrían superar los que sufrió la ciudad de México en 1985. Investigaciones, encabezadas por la UNAM, confirman la existencia de la llamada *brecha de Guerrero* (capítulo 2), lugar donde se tiene el conocimiento de sismos ocurridos en el pasado, entre 1909 y 1911 con magnitudes mayores a 7.5, que pudieron haber fracturado este segmento de la falla.

Sin embargo, la escasa información con que se cuenta no permite definir las zonas de ruptura de este segmento y por lo tanto se espera que en un futuro próximo esta brecha libere energía acumulada por más de 70 años en la zona.

El terremoto del 19 de septiembre de 1985, originado en Michoacán, tuvo sus principales efectos en la ciudad de México, causó alrededor de 10 mil muertos y 30 mil heridos y demostró la poca capacidad para una respuesta rápida.

Para ello fue creado el Sistema de Alerta Sísmica (SAS) para la ciudad de México. Es un sistema de advertencia temprana, que emite en el valle de México un aviso anticipado de 60 segundos del inicio de un sismo de gran magnitud con la finalidad de reducir los alcances de un desastre en la capital. Sin embargo, son pocas las escuelas, las unidades habitacionales y edificios públicos que cuentan con este sistema. Además, la alerta sísmica no se activa cuando los temblores son causados por sismos de pequeña magnitud o por sismos fuera de la costa de Guerrero como son algunos sismos de falla normal u otros eventos sísmicos que provienen de diferentes brechas sísmicas donde no se cuenta con este tipo de sistema y que pueden causar graves daños en algunas partes de la República Mexicana. Esto resulta comprensible porque el dinero que recibe el SAS es insuficiente para renovar y perfeccionar la tecnología y solventar las actividades de investigación que aseguren su viabilidad.

1.1 Sismos de falla normal

Otro peligro para las grandes ciudades asentadas a lo largo de la faja volcánica son los sismos que ocurren a profundidades mayores a 50 Km. Estos sismos se localizan dentro de las placas oceánicas que subducen bajo el continente. Ocurren cuando el esfuerzo aplicado sobre el plano de la roca es de tensión el cual produce grandes deformaciones provocando que la roca se rompa, produciendo la liberación de energía que genera las ondas sísmicas.

Históricamente los sismos de falla normal en la placa de Cocos subducida han causado daños en ciudades y pueblos en el antiplano mexicano, como en los casos de las ciudades de Morelia y México (1858), Oaxaca (1931) y Orizaba (1973). Claramente este tipo de sismos presenta un peligro y riesgo sísmico significativos para el país.

La magnitud de estos sismos rara vez llega a sobrepasar 7.0, y su ocurrencia es mucho más esporádica, es decir, que los periodos de recurrencia son mayores en comparación a los sismos de la costa. Sin embargo, debido a la ubicación de la fuente y la cercanía de las grandes poblaciones, estos sismos también constituyen un riesgo alto a la población central de México.

Se muestran en la figura 1.2 cuatro cortes hechos a la figura 1.1, en donde se observa cómo cambia la pendiente de la placa de cocos ya subducida (Pardo y Suárez, 1995). Este cambio es a lo largo de la zona de subducción en la parte central de México, la placa de Cocos subducida cambia hasta una profundidad de aproximadamente 50 km y su ángulo de subducción es pequeño (aproximadamente 15 grados), este cambio puede ser importante debido a que si es pequeña la pendiente de la placa subducida crece la probabilidad de que ocurran sismos de falla normal e intraplaca que afecten a una mayor parte del territorio nacional como sería el caso de la ciudad de México. En la porción sureste de México ocurren sismos con profundidades de hasta 150 km y el ángulo de subducción se incrementa hasta aproximadamente 45 grados disminuyendo la probabilidad de que este tipo de sismos afecten a lugares lejanos de las costas de México.

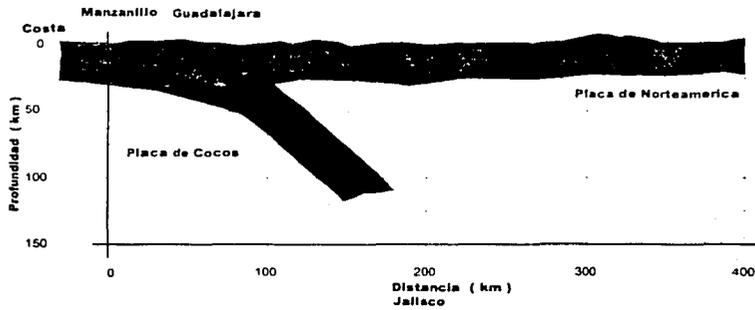
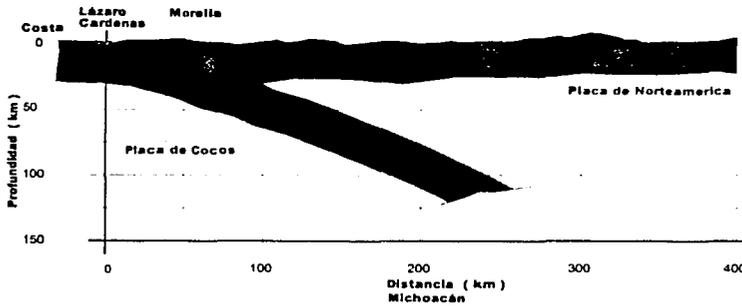
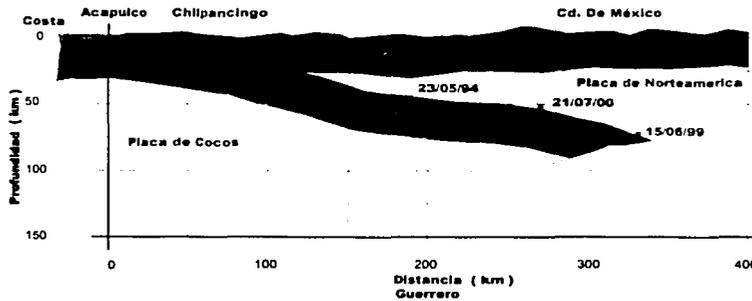
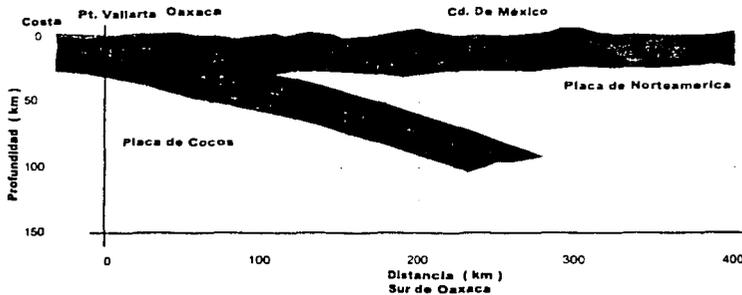
Corte A (Jalisco-Ciudad de México, ángulo de subducción aproximadamente de 45°)Corte B (Michoacán-Ciudad de México, ángulo de subducción aproximadamente de 35°)Corte C (Guerrero-Ciudad de México, ángulo de subducción aproximadamente de 10°)

Figura 1.2 Cambios en la placa de Cocos subducida (Pardo y Suárez, 1995)



Corte D (Sur de Oaxaca-Ciudad de México ángulo de subducción aproximadamente de 12°)
Figura 1.2 (Continuación)

En la Tabla 1.1 se muestran algunos de los eventos sísmicos que han ocurrido en México debido a falla normal y algunos de intraplaca (de estos se hablará más adelante). Esta tabla se realizó gracias a que existe información de sismos históricos en nuestro país desde el año 1 pedernal (alrededor de 1455) hasta el 27 de diciembre de 1912 obtenidos de fuentes hemerográficas (Acosta y Suárez, 1996). Con este tipo de información es posible observar el comportamiento sísmico de una región o de una falla geológica activa desde dos ventanas, la primera es la historia de sismos de los que se tiene registro instrumentado en los últimos cien años (capítulo 2) y la segunda evaluando cualitativamente documentos históricos que describen los daños producidos por sismos ocurridos en épocas anteriores (Tabla 1.1). Es claro, entonces, que si sólo se contemplan los registros instrumentados del siglo XX para tipificar la actividad sísmica, se tendría el riesgo de omitir la presencia de sismos importantes y de magnitud considerable de distintos orígenes.

También de la Tabla 1.1 se puede conseguir otras cosas. Por ejemplo: cómo sentían y que creían sobre este fenómeno algunas personas en el pasado, qué daños provocaba en algunas poblaciones del país en sus casas, templos e iglesias, qué efectos generaba en los cerros, de qué magnitud podrían haber sido estos sismos, en qué parte ocurrió con mayor intensidad algunos de ellos, así como conocer que estos eventos ocurren desde épocas lejanas y que seguirán ocurriendo sismos en México. Es claro entonces que la finalidad de esta tabla es proporcionar una mayor sensibilidad a los ingenieros que los sismos de falla normal e intraplaca son importantes, y que no solamente son los sismos de subducción los que provocan graves daños y cuantiosas pérdidas económicas para el país.

1.3 Sismos intraplaca

Son los que se originan en el interior de la placa de Norteamérica a profundidades no mayores a 30 km y por lo general presentan mecanismos de falla normal, aunque pueden tener algunos mecanismos de tipo compresivo y también pueden estar asociados a volcanes. Estos sismos, que ocurren ocasionalmente en todo el mundo, son probablemente causados por esfuerzos acumulados de presiones desarrolladas en la frontera de las placas. También este tipo de eventos pueden alcanzar magnitudes tan grandes como 6.5 y por su poca profundidad también pueden causar grandes y severos daños a las poblaciones cercanas al epicentro. Por su corta distancia son ricos en energía de alta frecuencia y pueden causar derrumbes y daño para pequeñas edificaciones que usualmente no son afectadas por sismos grandes y distantes. Algunos eventos que han ocurrido en la historia se mencionan en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Algunos sismos de falla normal e intraplaca en la historia de México

Año	Efectos	Epicentro, Mag y Tipo
1469	Xochitepec, Edo. de México. "En el primer año de la elección del rey Azayácatl sexto rey de México, dice que temblaron tres cerros en la provincia de Xochitepec (que es en la costa de Anáhuac) pronosticando aquel inusitado temblor y movimiento a los naturales de aquella tierra la sujeción en que Axayácatl los había de poner." Costa Chica, Gro. "(...) año de un fortísimo temblor que ocasionó derrumbe de muchos cerros con fuertes desgracias personales. Catastrófico en Costa Chica."	FN
1475 (9 caña)	República Mexicana. "En el año 9 acatl, 1475, un fuerte temblor de tierra destruye diversos edificios." Valle de México. "Tuvo lugar un temblor, muchos cerros se dislocaron y aplastaron casas" (Códice Aubin), "Al sexto año del reinado (Axayácatl) tembló la tierra y fue tan recio el temblor que sólo se cayeron muchas casas, pero los montes y sierras y en muchas partes se desmoronaron y deshicieron(...)". "(...) se abrió en algunas partes la tierra y se hundieron las cumbres de algunos cerros." Chalco. "(...) hubo por entonces fortísimos temblores de tierra, tan frecuentes y repetidos que los cerros de desgajaron en pedazos, las casas quedaron aplastadas."	FN
1512	Valle de México. "En este año hubo grandes nieves y tembló la tierra tres veces". "Tres temblores de gran intensidad. Coincide con la gran erupción del Popocatepetl."	
1593	Sinaloa. "Temblor de tierra espantado y desusado, un cerro de peña viva llamado Mochicavi se rompió y abrió, por su boca arrojó cantidad de agua."	
06/05/1622	Zacatecas, Zac. "Tembló en Zacatecas con mucha fuerza, causando el sacudamiento notables estragos en los edificios. Por espacio de cuatro meses continuaron repitiéndose los temblores dando origen a que despoblara la ciudad (...)."	Intra
13/10/1663	Puebla, Pue. "Sentido (...) con fuerza"	
24/02/1664	Puebla, Pue. Temblor	
9/07/1669	Puebla; Tlaxcala. "(...) en la mañana del (...) volvió a temblar.	
15/07/1669	Puebla; Tlaxcala. "Al amanecer tembló con mucha fuerza la tierra."	
7/08/1677	Puebla; Tlaxcala. "Tembló fuertemente la tierra."	
10/06/1680	Puebla; Tlaxcala. "A las ocho de la mañana de lunes santo, tembló la tierra con tal fuerza que inmediatamente mandó el rey que se tocara rogación."	
23/06/1681	México, D.F. "Este día tembló fuertemente, habiendo llovido antes; duró como tres credos. Puebla; Tlaxcala. "Vispera de San Juan Bautista (...) tembló la tierra espantosamente, durando dos credos que se rezaron (...)."	
24/08/1695	México, D.F. "Temblor grande." Puebla, Pue. "Fuerte (...) intensidad VII (Mercalli)."	
04/1696	Chihuahua. Terremoto en la Tarahumara.	Intra
26/08/1696	Orizaba, Ver. "En 1696, 26 de agosto, un horroroso terremoto, que se sintió en todo México, vino a aumentar las aflicciones de la población. Los edificios de Orizaba sufrieron graves deterioros en su mayoría; pero los que más sintieron hasta venirse a tierra por completo, fueron las iglesias y el hospital de San Juan de Dios. Este incidente lamentablemente conserno a la población que al punto procuró reedificar aquellos edificios (...). El temor de que ocurriera otro terremoto semejante, inspiró a los interesados de hacer un hospital de un hospital de un solo piso; y no será extraño que a esa misma causa se deba el que en lo antiguo aquí no se edificaran casa de dos o más pisos."	Intra

Tabla 1.1 (Continuación)

Año	Efectos	Epicentro, Mag y Tipo
29/09/1699	Tlaxcala, Tlax. "Tembló ligeramente."	
21/12/1701	Oaxaca. "Destrucción terrible (...) temblor extraordinario."	
16/04/1702 1711	Tlaxcala, Tlax. "Tembló ligeramente en Tlaxcala." Chietla, Pue. "(...) derribó la parroquia que en la actualidad está en buen estado (...)."	
15/08/1711	Puebla; Tlaxcala. "(...) fue tan fuerte el temblor de tierra que se cayeron las casas y templos."	
16/08/1711	México, D.F. "(...) hubo un temblor de tierra que causó muchas ruinas a los acueductos (...)." Puebla, Pue. "(...) se experimentó en este reino el flagelo de un recio terremoto que duró cerca de un cuarto de hora (...) por reducirse el daño a la ruina de diez y siete casa de las más inferiores y a la muerte de hasta veinte personas que quedaron oprimidas en las ruinas de ellas, los demás edificios han padecido todos alguna lesión sin excluir el palacio en donde demás de varias aberturas en sus paredes hubo el daño de haberse caído parte de la cárcel sobre la caballeriza produciendo la ruina de ésta, pero en Puebla y otras partes hacia el norte, ha sido mayor el perjuicio (...), (...) Gran destrucción. Mercalli: VII."	
6/02/1714	Córdoba, Ver. "Tembló ligeramente en la villa de Córdoba."	
5/05/1714	Córdoba, Orizaba, Ver.; Oaxaca. "Tembló con fuerza en Oaxaca, pueblos de la Cañada y Sierra del Norte del estado. El movimiento se sintió como a las 12 de la noche, fue de trepidación, duró 15 segundos (...) causó averías en los techos y paredes de las casas. Este terremoto causó en la ciudad de Córdoba horribles estragos y lo mismo en la de Orizaba. Casi destruido el convento de San Antonio en Córdoba."	
6/02/1716	Baja California. "Se sintió en Baja California un fuerte terremoto que causó grandes estragos en sus costas."	
19/03/1718	Puebla; Tlaxcala. "(...) hubo grande temblor de tierra."	
19/03/1727	Oaxaca, Oax. "(...) produjo tal daño al templo de la Compañía que fue necesario derrumbarlo para evitar mayores males." Puebla, Pue. Temblor	
17/04/1737	Puebla, Pue. "Tembló en Puebla."	
19/04/1748	Córdoba, Ver. "(...) Quedó impuesto por la carta de V. S. de 20 corriente de las ruinas y estragos que ocasionó en esa villa el fuerte terremoto experimentado (...)."	
1767	Misantla, Ver. "(...) perjudicó considerablemente el templo parroquial abriendo las paredes maestras y las bóvedas."	
28/07/1769	Baja California. "(...) se sintieron cuatro fuertes temblores, por lo que el río fue bautizado con el nombre de Jesús de los Temblores (...) juzgamos que tenemos delante, en la sierra que corre al oeste, algunos volcanes, pues hay bastantes señas (...) porque vieron los exploradores unos pantanos grandes de cierto material como pez que estaban hirviendo a borbollones (...) repararon que ésta corre por un lado y la brea por otro, y que hay con tanta abundancia, que se podían carenar muchas breas. Los movimientos de tierra repitieron el día 13."	
10/10/1777	Veracruz, Ver. "(...) solo si halle muy maltratado el plesbitero y sacristía de la parroquia (...), experimentó el pueblo de Perote un terremoto con dirección nordeste, cuya mayor fuerza duró cinco minutos (...), temblor que deterioró la parroquia de la Antigua, las casas curales, casas reales y cárcel (...)."	F.N
9/01/1784	Guanajuato, Gto. "(...) comenzaron a sentirse unos truenos subterráneos ue haciendo estremecer los edificios, llenaban de espanto a sus habitantes (...), (...) la aflicción que inspira un acontecimiento no experimentado (...)." República Mexicana. "Estruendos y movimiento subterráneos en todo el territorio."	

Tabla 1.1 (Continuación)

Año	Efectos	Epicentro, Mag y Tipo
16/01/1784	<p>México, D.F.; Guanajuato, Gto. "(...) se supo que en Guanajuato se habían oído muchos truenos subterráneos."</p> <p>México, D.F.; Tacubaya, Los Remedios, D.F; Puebla, Pue.; Chiautla, Mor.; Tulancingo, Hgo. "(...) se sintió en esta ciudad un leve movimiento de tierra (...) cuya duración apenas sería la de 8 segundos; y aunque en otros lugares más sólido suelo, como Tacubaya y los Remedios, se hizo más sensible, no hay noticia de que causara daño, como tampoco en Puebla, Tulancingo, Chiautla y otros, que lo sintieron con igual lentitud a la hora misma."</p>	
28/10/1786	<p>México, D.F.; Veracruz; Puebla; Oaxaca. "Se sintió en varios pueblos del estado de Oaxaca un fuerte temblor de tierra con movimientos de oscilación de norte a sur no ocasionó males en las casa. En Veracruz, Puebla y México fue más fuerte. También lo sintieron otras localidades del oeste y sur de la república."</p>	
26/03/1787	<p>Durango, Dgo. "Tembló en Durango con ruidos subterráneos.", "el terremoto fue fuerte y se sintió (...) con tanto estrépito en las cavidades de las minas, que al parecer se desplomaban todos los techos de las casas."</p>	
28/3/1787	<p>Oaxaca, Oax. "En estos territorios he visto iglesias que fueron famosas por sus gruesos y tamaños (...) y que en el día se hayan casi todas de mampostería inhabitables, cuarteadas, desplomadas, caídas en parte y hechas un horroroso espectáculo (...)."</p> <p>Republica Mexicana. "(...) las piedras saltaban del suelo". "(...) los montes retumbaban y desmoronaban, precipitándose los grandes peñascos en las cañadas y barrancos con ruido espantoso"</p>	Guadalajara, 7.7
27/04/1787	<p>San Miguel Tomatlán, Ver. "(...) la ruina que los repetidos temblores han causado en la iglesia parroquial del pueblo de San Miguel Tomatlán (...)."</p>	
4/09/1787	<p>México, D. F. "Movimiento de tierra de oriente a poniente con duración de cerca de dos minutos, sin causar daño alguno."</p> <p>México, D.F.; Oaxaca, Oax.; Veracruz; Puebla. "Se sintió en Oaxaca y sus pueblos un temblor algo fuerte no causó males en las casas; su duración no pasó de 20 segundos. En Veracruz, Puebla, México y otras localidades de la República fue más fuerte y causó algunos perjuicios."</p>	
13/12/1787	<p>México, D.F.; Oaxaca, Oax.; Puebla; Veracruz. "Se sintió en Oaxaca un terremoto de trepidación algo fuerte que no causó daños a las casas. En Puebla, Veracruz y México, así como en otras localidades fue más fuerte."</p>	
5/01/1789	<p>Puebla, Pue. "Temblor fuerte."</p>	
14/01/1789	<p>Veracruz, Ver. "Después de un fuerte norte vino un fuerte terremoto."</p>	
6/07/1789	<p>México, D.F. "Fuerte terremoto de dos minutos, con dirección de nordeste a sudoeste; repitió media hora después aunque con lentitud."</p> <p>Celaya, Gto. "Temblor de tierra de dirección norte a sur, de corta duración (...)."</p>	
20/04/1789	<p>México, D.F. "No causó estragos en la ciudad de México."</p> <p>Córdoba, Ver. "(...) fuerte terremoto que ha causado considerable ruina, no habiendo quedado libre de ella ningún edificio, y particularmente los de mayor elevación, la torre de la iglesia parroquia, destruida una de sus esquinas amenaza la total destrucción del templo (...)."</p>	

Tabla 1.1 (Continuación)

Año	Efectos	Epicentro, Mag y Tipo
2/03/1792	<p>México, D.F.; Veracruz, Ver. "Tembló muy fuerte en Veracruz y ligero en México."</p> <p>México, D.F.; Oaxaca, Oax.; Veracruz; Puebla. "Se sintió en Oaxaca y sus pueblos un temblor de tierra con movimientos de trepidación, algo fuerte. En Veracruz, Puebla y México fue bien fuerte el sacudamiento."</p>	
10/09/1792	Veracruz, Ver. "(...) acaba de experimentarse un fuerte terremoto, cuya duración ha sido poco menos de medio minuto, su movimiento trepidante (...) no tengo noticia de que haya habido desgracia alguna, ni creo que se haya experimentado por su corta duración."	
17/03/1800	México, D.F.; Oaxaca, Oax.; Veracruz; Puebla. "Hubo en Oaxaca y otros pueblos del estado un fuerte temblor oscilatorio que duró 26 segundos y no causó daño alguno a las habitaciones. En Veracruz, Puebla y México fue más fuerte en su sacudamiento que en Oaxaca."	
13/07/1827	Tehuacán, Pue. " (...) los sacudamientos fueron violentos (...) 'Que ruidos subterráneos y qué sacudamientos tan espantosos! (...) Está trepidación ha causado averías; se han visto cuarteadas las paredes de muchas casas particulares y las de la parroquia y convento del Carmen."	
22/11/1837	<p>Valle de México. "El sacudamiento de tierra que se ha sufrido ha derribado es está ciudad porción de paredes y maltratado varios edificios, puentes y cañerías (...)" "(...) la trepidación fue fuerte y siguieron despues oscilaciones de NE a SO, los edificios y las arqueras sufrieron mucho, pero no hubo desgracias (...)" "(...) han sido muchas las casas tanto de conventos , de religiosos y de religiosas que se vieron resentidos así como particulares". "(...) se sintio en Oaxaca a las 12:18 de la noche, y en México a las 12:30, es decir, doce minutos más tarde. En Guadalajara se sintió a las 11:58, lo que resultaría a la misma hora en Guadalajara.(...) lo que confirma la idea de que en Oaxaca se sintió primero que en la capital de Guadalajara-Jalisco (...) en Guadalajar el movimiento fue de este a oeste, y en la ciudad de norte a sur"</p> <p>República. "Querretaró y tras localidades fue más fuerte, pero ninguna como en Morelia, colima y Guadalajara, que sufrieron grande estrago. Este terremoto se atribuyo al volcán de Colima"</p> <p>Oaxaca. "(...) duro 40 segundos con moveimeintos trepidatorios."</p>	Oaxaca, 7.5
30/08/1838	Monterrey, Villa de Santiago, Morelos, N.L. "Terremoto, que tendria la duración de uno o dos segundos."	
12/05/1841	Saltillo, Coah. "(...) se sintió en esta ciudad un ruido ronco, pavoroso, subterráneo (...) su duración fue la de dos o tres segundos y sus movimientos según algunos, de oscilación (...). A este fenomeno se atribuye el que hayan resentido o cuarteado algunas casa y tapias de esa población (...)"	
9/03/1845	<p>D.F. "No hubo edificio ó particular de la ciudad, fuerte ó débil, que no descompusiera algún tanto, las torres y bóvedas de los templos, la arqueria, techos y paredes de la casa (...) en Puebla, Veracruz, México, Guadalajara y otras localidades de República, se sintió tambien el sacudamiento pero con menos intensidad", "El temblor empezo en Oaxaca."</p> <p>Oaxaca. "(...) hubo algunos muertos por haber caído varias casas, y en todas en general se han partido (...)"</p>	

Tabla 1.1 (Continuación)

Año	Efectos	Epicentro, M y Tipo
19/06/1858	<p>D.F. "(...) el movimiento fue al principio de trepidación, al que siguieron oscilaciones, primero de Norte a Sur y después de Este a Oeste. (...) la totalidad de las casas padecieron y muchos de los edificios tambien sufrieron bastante (...) entre las construcciones que más sufrieron se cuentan los acueductos de San Cosme y Chapultepec". "...Movimiento trepidatorio (...) a ese movimiento siguieron fuertes oscilaciones, que violentamente cambiaron de dirección en movimiento ondulatorio". "Este temblor no tuvo repetición". " A consecuencia del mal estado en que los dejó el temblor han sido cerrados los templos del Sagrario, Santa Brígida y San Fernando (...)"</p> <p>República. Oaxaca. "el sacudamiento de trepidación fue algo fuerte y no causó ningún mal a los edificios (...) sentido en México, Guadalajara, Morelia y Colima. En México causó grandes estragos, pues padecieron notablemente las iglesias de (...)". (...) en Chilpancingo cayeron 60 casas (...)" "(...) En Morelia padeció la Catedral, que es un edificio muy sólido". "(...) en Pátzcuaro la iglesia parroquial (...)" "Se atribuyó este terremoto al volcán de Jorullo.</p> <p>Texcoco. "(...) los depositos de agua pluvial...sufrió una notable alteración...la que bien pudo acontecer a causa de un derrumbe subterráneo en la montaña trachítica de Córdoba y Río Frío, por lo cual oyeron los habitantes de Texcoco conmociones (...)"</p> <p>Pachuca. "(...) fue demasiado leve (...)". Michoacán "Puede establecerse que este terremoto partió del centro que existe entre Michoacán y Jalisco"</p> <p>Morelia. "(...) entre los edificios, no quedo uno sano, y muchos vinieron a tierra con gran estrépito, con muchas costernaciones...que jamas han visto cosa semejante."</p> <p>Toluca. Causo daños. Localización (18.00, 100.8). Profundidad 50 km. Sismo de falla Normal</p>	Michoacan, 7.7, F.N.
3/05/1887	<p>D.F "(...) El fenómeno duró cerca de un minuto, pero despues fue muy suave, oscilatorio, y de sur a norte, los sabios presagian grandes terremotos parecidos a los de Niza y Saboya, y las comadres dicen ya es tiempo de que dance la tierra."</p> <p>Chihuahua "(...) Nosotros sentimos que la mesa sobre la que escribimos estas líneas nos imprimía un movimiento oscilatorio, y por más que dudábamos del hecho, al oír crujir el techo de la oficina, que se preparaba sin duda a darnos anticipada sepultura, no pudimos menos que exclamar con Galileo: "Sin embargo, ella se mueve, (...)"</p> <p>Bavispe, Son. "Entre los fenómenos que acompañaron y siguieron al temblor, (...) la creciente inesperada y repentina de los afluentes del río Yaqui (...) aparición de algunos nuevos aguajes y desaparición de otros, (...) incendio de todas las sierras cercanas al epicentro, y aun algunas bastantes lejanas situadas en el territorio de Arizona, (...) según parece, la suposición de que había aparecido un volcán, (...) otro explican, (...) choques de las piedras (...)". "(...) el pueblo de Bavispe enteramente destruido (...)"</p>	Bavispe, Sonora 7.3, Intra
19/11/1912	<p>Acambay "(...) de las montañas se desprendieron algunas rocas", dentro de la placa de norteamérica. Son menos frecuentes y de menor magnitud, aunque pueden ser destructivos para los asentamientos humanos situados a distancias epicentrales cortas.</p>	7.0, Intra

Tabla 1.1 (continuación)

Año	Efectos	Epicentro, M y Tipo
04/01/1920	Temblor que ocurrió dentro de la placa continental, generó daños considerables en diversos asentamientos humanos.	Jalapa, 6.4, Intra
10/02/1928	Localización (18.26, 97.99). Profundidad 84 km.	6.5, F.N
17/04/1928	Localización (17.69, 96.44) Profundidad 115 km.	6.0, F.N
04/08/1928	Localización (16.83, 97.61) Oaxaca	7.4
15/01/1931	Localización (16.34, 96.87). En esta zona han continuado ocurriendo sismos de magnitudes de 4.1 y 5.7 (Singh, 1995), (Singh, 1985). Profundidad ≈ 40 km. El momento sísmico $M_0 = 2.35 \times 10^{20}$ N.m. Este sismo causa grandes daños en la ciudad de Oaxaca	Oaxaca, 7.8, F.N
26/07/1937	Localización (18.48, 96.08). Profundidad de 85 km. Sismo de falla Normal	7.3, F.N
11/10/1945	Localización (18.32, 97.65). Profundidad 95 km. Sismo de falla Normal	6.5, F.N
28/07/1957	El momento sísmico fue de 5×10^{27} dina-cm (Singh et al, 1982), el cual es aproximadamente 3 veces más grande de lo esperado para un sismo de 7.5. El sismo seguramente fue energético cerca de 2 seg de periodo en vista de los daños causados en la zona de lago de la ciudad de México. En base a los sismogramas de algunos temblores mexicanos en Pasadena, Cal. Se muestra que este temblor fue muy energético a cortos periodos. Estas características muy peculiares del sismo pueden repetirse durante futuros temblores en la brecha de Guerrero. El momento sísmico $M_0 = 5.13^{18}$ N.m	7.2, F.N
24/05/1959	Localización (17.72, 97.15). Profundidad 80 km. Sismo de falla Normal	6.8, F.N
26/08/1959	Sismo de Intraplaca	Jaltipan, 6.4, Intra.
06/07/1964	Localización (18.31, 100.50). Sismo de falla normal en Tlapehuala, Gro. Profundidad de 55 km. Fue el tercer evento en México el cual dio auge a los acelerogramas en la ciudad. El momento sísmico $M_0 = 1.15 \times 10^{20}$ N.m. Fue tomado para el RCDF 87. El momento sísmico $M_0 = 1.15 \times 10^{27}$ dinas.cm. La caída de esfuerzos $\Delta\sigma = 256$ bars.	Tlapehuala, 7.3, F.N
28/08/1973	Localización (18.00, 96.55). En Orizaba, Ver. A una profundidad de 82 km. El momento sísmico $M_0 = 0.41 \times 10^{20}$ N.m	Orizaba, 7.0, F. N
12/07/1974	Fue tomado para el RCDF 87.	Sismo Local
26/10/1980	Localización (17.90, 98.15). En Huajuapán de León a una profundidad de 65 km, en esta han ocurrido sismos de magnitudes de 4.5. Fue tomado para el RCDF 87. El momento sísmico $M_0 = 6.49 \times 10^{26}$ dinas.cm La caída de esfuerzos $\Delta\sigma = 145$ bars	Huajuapán León, 7.0, F.N
15/08/1987	Localización (17.52, 97.15). Profundidad 67 km. Sismo de falla Normal. El momento sísmico $M_0 = 0.026 \times 10^{20}$ N.m.	5.9, F.N
23/02/1994	Localización (17.75, 97.27). Profundidad 74 km. Sismo de falla Normal.	5.4, F.N
22/04/1994	Localización (18.15, 100.63). Profundidad 50 km. Sismo de falla Normal. El momento sísmico $M_0 = 6.0 \times 10^{22}$ dinas.cm La caída de esfuerzos $\Delta\sigma = 12$ bars	4.1, F.N
06/05/1994	Localización (18.39, 97.98). Profundidad 57 km. Sismo de falla Normal. El momento sísmico $M_0 = 1.1 \times 10^{25}$ dinas.cm. La caída de esfuerzos $\Delta\sigma = 44$ bars	4.9, F.N
23/05/1994	Localización (18.03, 100.57). Profundidad 50 km. Sismo de falla Normal. El momento sísmico $M_0 = 2.8 \times 10^{25}$ dinas.cm. La caída de esfuerzos $\Delta\sigma = 156$ bars	5.7, F.N
11/01/1997	Lat. 18.06 y Long 102.79 Prof. 34	7.1, F.N
15/06/1999	Localización (18.18, 97.51). Profundidad 69 km. Sismo de falla Normal. El momento sísmico $M_0 = 2.0 \times 10^{26}$ dinas.cm La caída de esfuerzos $\Delta\sigma = 15$ bars	6.5, F.N
30/09/1999	Localización (16.00, 97.02). Similar al sismo de 1931. Este sismo ocurrió en Puerto escondido y la profundidad es de 55 km. El momento sísmico $M_0 = 2.0 \times 10^{27}$ dinas.cm. La caída de esfuerzos $\Delta\sigma = 216$ bars	Oaxaca, 7.5, F.N.
21/07/2000	Localización (18.09, 98.97). Profundidad 47 km. Sismo de falla Normal. El momento sísmico $M_0 = 6.0 \times 10^{24}$ dinas.cm La caída de esfuerzos $\Delta\sigma = 360$ bars	5.9, F.N

Nomenclatura:

F.N: Sismo de falla Normal; Intra: Sismo de intraplaca; M: Magnitud del evento

Como se puede observar en la Tabla 1.1, claramente este tipo de sismos presenta un peligro significativo para el país y el valle de México. Esto es importante debido a que hoy en día se ha estado reconociendo la necesidad de proteger las estructuras no sólo ante sismos con una probabilidad muy pequeña de ocurrir y de gran intensidad previniendo el colapso de estas, sino también, ante sismos de menor intensidad que ocurren con mayor frecuencia, con el fin de evitar daño tanto en los elementos no estructurales como estructurales (capítulo 5).

En esta Tabla 1.1 se observan algunas particularidades de los sismos de falla normal e intraplaca como son los siguientes: provocan el desgarramiento de cerros, el daño en las bóvedas de los templos, parroquias, conventos, hospitales viejos, casas habitación, acueductos, etc. Esto es importante de reconocer porque existen en la ciudad de México cientos de templos y monumentos históricos en el que el valor histórico es muy importante y el que sufran algún grave daño este tipo de estructuras no debe ocurrir. También existen zonas en la ciudad de México donde diversos asentamientos irregulares han ocurrido, a pesar de reconocer la misma gente que existe un gran riesgo en habitar esos lugares debido a que las cavidades de antiguas minas de material de explotación que se encuentran por debajo de las casas se pueden derrumbar o haya algún deslave en estos lugares debido a un sismo u otro fenómeno y aplaste o hunda sus casas.

Algunas personas han observado que el movimiento en la ciudad de México en algunos casos llega a ser en un principio de trepidación, al que siguen oscilaciones primero de Norte a Sur y después de Este a Oeste. Además una cosa que me parece interesante denotar es que las gente escucha ruidos subterráneos en la mayoría de estos eventos (al parecer en el epicentro del evento sísmico). Algunos lugares de acuerdo a esta Tabla 1.1 donde más se han originado sismos recientes de falla normal son: Oaxaca, Puebla, Veracruz. También sorprenden zonas donde generalmente no se esperaría ocurrieram sismo como son en Monterrey, Sonora, Chihuahua, Tlaxcala, Guanajuato. Sin embargo, de acuerdo a la historia es posible esperar eventos de intraplaca en estas partes del Norte del país.

Otra cosa que se destaca de la Tabla 1.1 es que para algunos sismos tenemos datos importantes como son el momento sísmico y la caída de esfuerzos de los cuales hablaremos en el capítulo 4. Finalmente en este tipo de eventos sísmicos (falla normal e intraplaca) el movimiento es más sensible en el terreno firme de la ciudad de México.

Para terminar quiero hacer una reflexión final: a pesar de que se cuenta con una gran historia de los sismos en México, de toda la cantidad de daños que han causado los sismos de subducción y falla normal en el país, no existe una cultura de prevención en la ciudadanía para saber qué hacer antes, durante y después de un sismo.

Capítulo 2

Movimiento sísmico en el valle de México en terreno firme

En el anterior capítulo se mostró la importancia que tienen los sismos de falla normal y los daños que han ocasionado en algunas ciudades de la República Mexicana. En este capítulo se describe de manera breve cómo las ondas de un sismo de falla normal se transmiten en el país y llegan desde el epicentro a la ciudad de México. Además se analizan los espectros de amplitudes de Fourier (EAF) generados por las diversas brechas sísmicas que existen en el país, y se comparan los EAF generados por sismos de falla normal con los que se generan en las diferentes zonas sísmicas, todo esto para un sitio en ciudad universitaria (CU). Por último, se presentan los desplazamientos del terreno provocados por dos sismos de falla normal para denotar la importancia que tienen la topografía y características del valle en la amplificación y duración del movimiento.

2.1 Características del valle de la ciudad de México

El valle de México es una cuenca cerrada de 110 km de largo en el sentido norte-sur (NS) y 80 km de ancho en el este-oeste (EW). Tiene una altitud de 2236 m.s.n.m. en su parte más baja y alcanza hasta 5230 m.s.n.m. en la más alta: la punta del Iztacihuatl.

La figura 2.1 muestra la parte sur-oeste del valle donde la ciudad está localizada. Algunas referencias de sitios y calles principales están indicadas, así como las estaciones acelerométricas y las tres principales zonas geotécnicas: (I) Zona de lomas, localizada en las partes altas del valle, formada por rocas volcánicas, suelos pocos compresibles y alta resistencia. (II) Zona de transición, con características mixtas de zona de lomas y transición. (III) Zona de lago, consiste de depósitos aluviales, lacustres y de arcilla altamente compresible con altos contenidos de agua. También se muestran las estaciones acelerométricas.

Es la arcilla deformable de la ciudad de México la que principalmente provoca los efectos de sitio (capítulo 3). Esta puede alcanzar espesores hasta de 100 m. Sin embargo, se cree que la amplificación de la onda también es debida al contraste que existe entre la caliza de los cretáceos y a los variados depósitos profundos encima de 3 km en algunos sitios. La velocidad de onda de cortante en los depósitos superiores de la arcilla puede ser tan baja como 50 m/s y el contenido de agua superior a 400%. Este alto contenido de agua no es adecuado para cimentar las estructuras pesadas; por consiguiente, los asentamientos de los edificios son un problema común en la ciudad. Estos asentamientos pueden producir alguna inclinación en las estructuras que los hacen más vulnerable para resistir los sismos. El fenómeno de asentamientos en la ciudad es un problema que complica la respuesta sísmica de las estructuras.

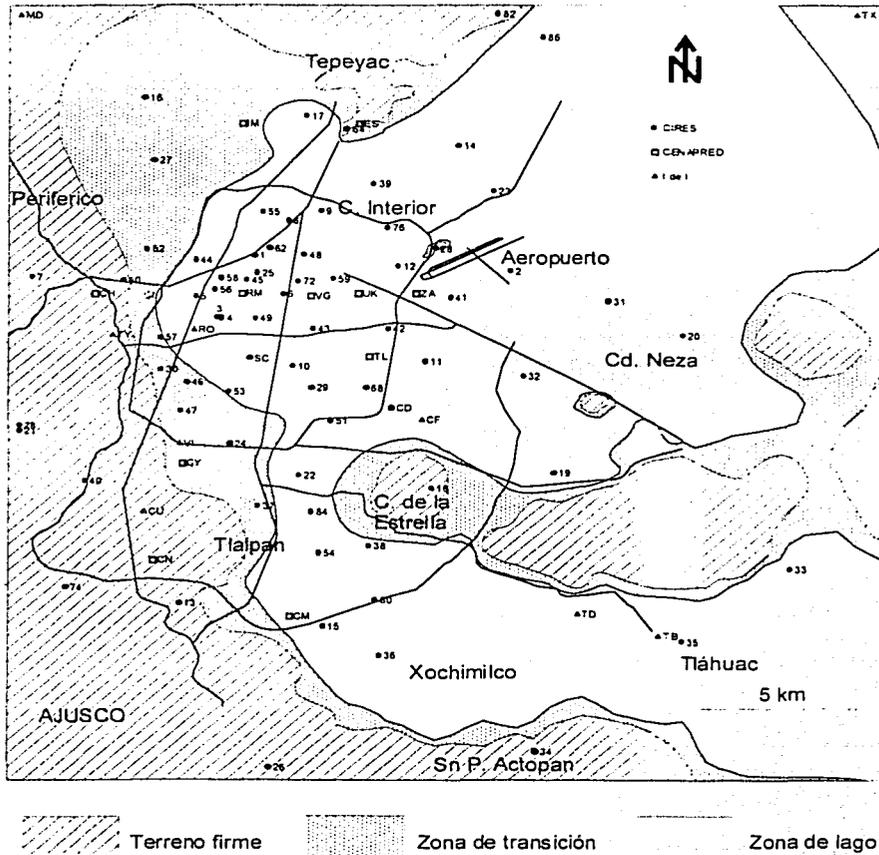


Figura 2.1 Valle de México: Estaciones acelerométricas, algunas principales avenidas, referencias y zonas geotectónicas

2.2 Movimiento observado desde el epicentro hasta la Ciudad de México

En la figura 2.2 se muestra un ejemplo ilustrativo de las características del movimiento del suelo del epicentro hacia la ciudad de México. Esta figura muestra la aceleración para el componente norte-sur registrado para el sismo de 15 de junio de 1999 (Evento 77 de la fig. 2.3), cuyo epicentro se localizó al sur de Tehuacán Puebla, causando daños y pérdidas humanas en los estados de Puebla y Oaxaca. También se sintió en otros lugares cercanos al epicentro y en el valle de México. En esta figura se observan claras diferencias de las características de los movimientos entre los sitios lejanos y cercanos del epicentro. Los registros de los sitios cercanos tienen corta duración, gran amplitud y un gran contenido de energía de alta frecuencia, mientras que los otros tienen mayor duración, una menor amplitud y contenido rico en bajas frecuencias. La atenuación de la amplitud del movimiento sísmico puede ser observada hacia el este, oeste y norte. Pero las diferencias son mayores en la zona del lago de la ciudad de México mostrando claramente la amplificación en el valle. Estudios más formales relacionados a la fuente y efectos de la trayectoria han sido realizados por Ordaz *et al.* 1992.

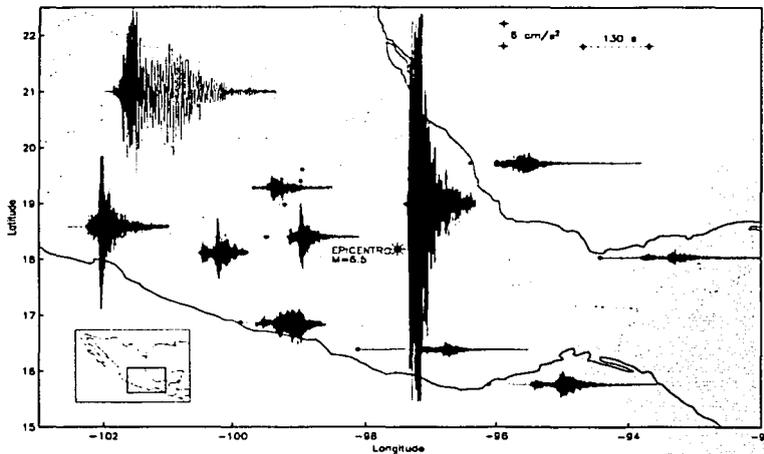


Figura 2.2 Aceleraciones durante el sismo de 1999 en varios sitios en México, incluyendo las zonas de lomas y lago en la Ciudad de México.

2.3 Movimientos en sitios de Lomas

2.3.1 Espectros de Fourier en CU tomando en cuenta zonas sismogénicas

Gracias a los catálogos de los grandes temblores se ha podido estimar periodos de recurrencia para algunos segmentos de la zona de subducción. El concepto de brecha sísmica surge para designar a un segmento de la zona de subducción en la cual no se ha producido un temblor de importancia en un lapso relativamente grande. Con base en estas consideraciones se han identificado diferentes brechas sísmicas en México como son las de Michoacán, Petatlán, Guerrero, San Marcos y Ometepec entre otras (Ver figura 2.3).

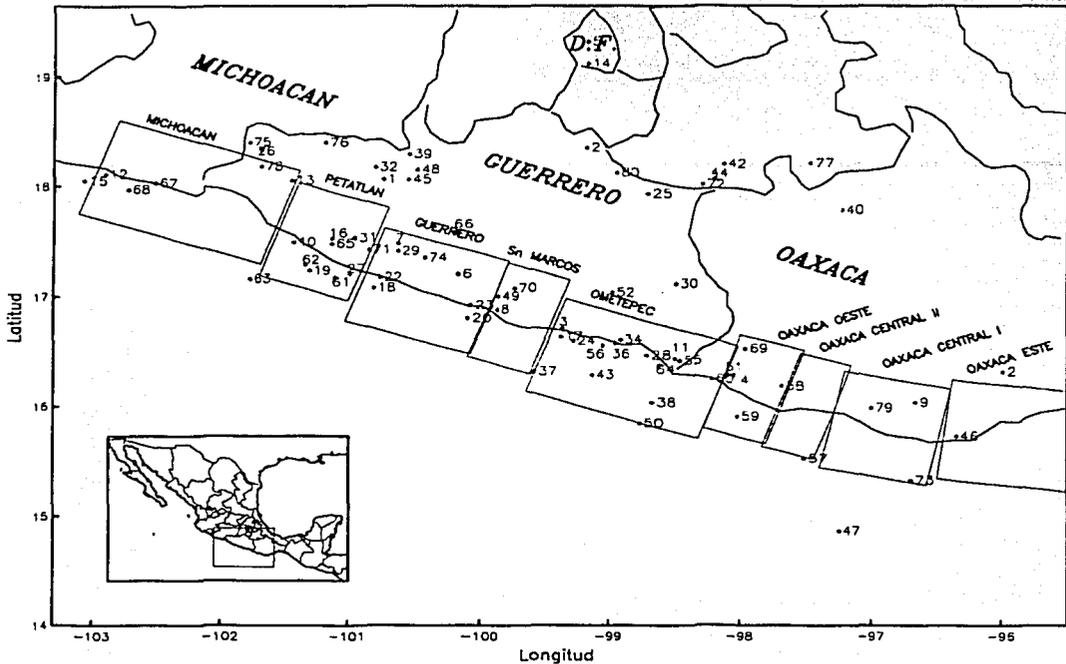


Figura 2.3 Sismos registrados en CU de distintos orígenes. (Ver Tabla 2.1)

A través del EAF en Ciudad Universitaria (CU) que es una medida cuantitativa de las amplitudes del movimiento en la superficie del terreno se trata de caracterizar el movimiento en las diferentes brechas sísmicas. La razón para usar CU es que a raíz de los daños ocasionados por el sismo de 1957, surge la necesidad de conocer las características del movimiento en diferentes sitios de la ciudad de México. Por ello se instalaron dos acelerómetros, uno en zona de lago en el centro de la ciudad y otro en terreno firme (Ciudad Universitaria, CU). Y entonces, desde 1964, el sitio CU ha registrado movimientos de más de 80 sismos moderados y fuertes, de diferentes tipos, ya sea de subducción o falla normal. Algunos de estos sismos registrados se señalan en la Tabla 2.1. También en esta tabla se indica la fecha de ocurrencia, el origen del sismo, la región sismogénica a la que cada sismo pertenece, la magnitud, las coordenadas donde se localizó el epicentro, la profundidad a la que ocurrió el sismo, la distancia entre el epicentro y CU en km, el azimut en grados con respecto a CU, la aceleración máxima que se presentó en CU ya sea norte-sur o este oeste. En la última columna se informa para qué tipo de cálculo se utilizará el evento sísmico. Esto es importante destacar porque es en esta tabla donde se resumen todos los eventos sísmicos que se utilizaron para el desarrollo de este trabajo.

Tabla 2.1 Sismos registrados en la estación CU y en algunos otros sitios del valle de México

	Fecha	Origen	Brecha	M	Lat	Long	Prof.	Dist-CU	Azim-CU	Amax	Observacion
1	06-07-64	Norm	*	6.7	18.03	100.77	100	240	230	18.3	8
2	23-08-65	Sub	Oax Este	7.8	16.28	96.02	16	480	135	6.39	8
3	03-02-68	Sub	San Marcos	5.6	16.67	99.39	16	290	185	9.36	8
4	02-08-68	Sub	Oax Oeste	7.4	16.25	98.08	16	360	160	14.88	8
5	12-07-74	Intra	*	3.5	19.291	99.2	5	7	210	48.97	8
6	01-02-76	Sub	Guerrero	5.6	17.17	100.19	47	260	205	4.81	8
7	07-06-76	Sub	Guerrero	6.4	17.45	100.65	48	260	215	13.45	8
8	19-03-78	Sub	San Marcos	6.4	16.85	99.9	16	280	200	5.79	8
9	29-11-78	Sub	Oax Central2	7.8	16	96.69	19	450	140	7.43	8
10	14-03-79	Sub	Petatlán	7.6	17.46	101.46	20	320	230	19.45	8
11	07-06-82	Sub	Ometepec	7	16.4	98.54	15	330	165	11.49	8,12
12	19-09-85	Sub	Michoacán	8.1	18.08	102.94	15	430	255	34.07	1,2,3,4,5,6
13	21-09-85	Sub	Petatlán	7.6	17.62	101.82	15	340	240	14.8	8
14	19-10-85	Intra	*	-	19.09	99.2	5	27	185	8.815	8
15	30-04-86	Sub	Michoacán	7	18.02	103.1	16	450	255	4.54	8
16	08-02-88	Sub	Petatlán	5.7	17.49	101.16	19	290	230	2.87	8
17	25-04-89	Sub	San Marcos	6.9	16.6	99.4	19	300	185	13.4	1,2,3,4,5,6,7,9,10,11,12
18	11-05-90	Sub	Guerrero	5.5	17.05	100.84	13	310	210	2.39	8
19	19-05-90	Sub	Petatlán	4.3	17.2	101.33	5	330	225	0.86	8
20	31-05-90	Sub	Guerrero	5.9	16.77	100.12	21	300	210	5.07	1,3,4,5,7,9,10,11
21	27-10-91	Norm	*	3.9	18.321	99.207	43	110	175	6.82	8
22	30-10-92	Sub	Guerrero	4.7	17.14	100.79	21	300	215	15.79	8
23	10-11-92	Sub	Guerrero	4.2	16.887	100.1	6	280	210	0.39	8
24	24-12-92	Sub	Ometepec	4.4	16.561	99.306	12	300	182	0.34	8
25	06-01-93	Norm	*	4.4	17.9	98.74	65	170	155	0.34	8
26	11-03-93	Sub	Michoacán	5.3	18.31	101.73	5	300	250	0.81	8
27	31-03-93	Sub	Petatlán	5.3	17.18	101.02	8	300	220	1.07	8,9
28	15-05-93	Sub	Ometepec	5.8	16.43	98.74	20	320	170	3.08	8,9
29	29-07-93	Norm	Guerrero	5	17.38	100.65	43	270	215	0.92	8
30	05-08-93	Sub	Ometepec	5.1	17.08	98.53	32	260	160	0.54	8
31	26-08-93	Sub	Petatlán	4.9	17.5	100.99	27	280	225	0.29	8
32	29-08-93	Norm	*	4.8	18.14	100.83	69	230	235	0.38	8
33	03-09-93	Sub	*	6.8	13.98	92.79	6	910	130	0.44	8
34	10-09-93	Sub	Ometepec	4.8	16.57	98.94	20	300	170	0.55	8
35	10-09-93	Sub	Ometepec	7.3	14.14	92.82	14	900	130	0.71	8
36	24-10-93	Sub	Ometepec	6.6	16.54	98.98	19	300	170	3.49	1,2,3,4,5,6,7,9,10,11,12
37	13-11-93	Sub	San Marcos	5.7	16.28	98.61	15	340	185	0.42	8
38	21-12-93	Sub	Ometepec	4.9	16	98.7	5	370	170	0.24	8
39	19-07-93	Norm	*	4.8	18.26	100.56	51	190	235	0.43	8
40	23-02-94	Norm	*	5.8	17.75	97.27	75	280	125	1.04	8
41	14-03-94	Norm	*	6.5	15.67	93.01	95	790	120	0.76	4,5,10,11
42	06-05-94	Sub	*	4.9	18.17	98.16	9	170	135	0.54	8
43	14-05-94	Sub	Ometepec	4.8	16.25	99.17	17	330	175	0.24	8
44	22-05-94	Sub	*	4.2	18.03	98.24	6	170	140	0.28	8
45	23-05-94	Norm	*	6.2	18.03	100.57	23	210	225	4.97	2,3,4,5,7,9,10,11

Tabla 2.1 (Continuación)

	Fecha	Origen	Brecha	M	Lat.	Long.	Prof.	Dist-CU'	Azim -CU'	Amáz	Observacion
46	09/06/94	Norm	Oax Este	6.2	15.69	96.37	33	500	140	1.46	
47	04/07/94	Sub	*	5.9	14.83	97.29	31	530	155	0.75	5
48	12/07/94	Norm	*	4.5	18.12	100.5	62	200	225	0.31	1
49	29/10/94	Sub	San Marcos	5.1	16.97	99.89	24	270	210	0.76	1
50	10/12/94	Sub	Ometepec	6.6	15.81	98.79	20	290	170	5.48	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12
51	13/12/94	Sub	Oax. Oeste	5.3	16.25	98.12	16	350	160	0.38	8, 9
52	14/09/95	Sub	Ometepec	7.4	17	99	45	260	170	12.42	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 12
53	09/10/95	Sub	*	8	18.85	104.53	27	590	260	2.22	9
54	12/10/95	Sub	*	6.1	19.04	103.7	11	490	265	0.55	5, 8, 9, 11
55	30/10/95	Sub	Ometepec	5.3	16.38	98.5	21	330	165	0.48	1, 9
56	13/03/96	Sub	Ometepec	5.1	16.52	99.08	18	310	175	0.56	1
57	19/03/96	Sub	Oax. Central2	5.8	15.49	97.55	15	450	155	0.4	8, 9
58	20/03/96	Sub	Oax. Oeste	5.3	16.15	97.72	16	380	155	0.22	8
59	22/03/96	Sub	Oax. Oeste	4.7	15.87	98.05	15	400	160	0.19	8
60	27/03/96	Sub	Ometepec	5.5	16.21	98.25	7	350	160	1.08	1, 4, 9, 10
61	31/03/96	Sub	Petatlán	4.4	17.14	101.13	5	320	220	0.27	8
62	18/04/96	Sub	Petatlán	4.5	17.26	101.37	4	330	230	0.29	1
63	23/04/96	Sub	Petatlán	5.5	17.13	101.81	17	370	230	0.54	8, 9
64	22/05/96	Sub	Ometepec	4.7	16.34	98.65	22	330	170	0.31	
65	15/07/96	Sub	Petatlán	6	17.45	101.16	20	300	230	4.22	1, 6
66	18/07/96	Sub	Petatlán	4.7	17.54	101.2	20	290	210	0.92	1
67	11/01/97	Norm	Michoacán	7.1	18	102.55	35	400	250	5.86	1, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12
68	16/01/97	Sub	Michoacán	4.9	17.94	102.76	25	420	250	0.31	1, 4
69	21/01/97	Sub	Oax. Oeste	5.5	16.49	97.99	18	330	155	0.75	8
70	22/03/97	Sub	San Marcos	4.7	17.04	99.76	30	260	193	0.34	1
71	23/03/97	Sub	Petatlán	4.9	17.39	100.88	31	280	220	0.55	
72	03/04/97	Sub	*	5.1	17.98	98.33	30	170	145	1.96	
73	14/04/97	Norm	Oax. Central1	4.6	15.29	96.72	3	520	145	0.17	8
74	08/05/97	Sub	Guerrero	5	17.32	100.44	12	260	210	0.73	1
75	22/05/97	Norm	Michoacán	6.5	18.37	101.82	54	310	255	2.08	1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 10, 11
76	20/04/98	Norm	*	5.9	18.37	101.21	66	250	245	1.67	4, 5, 7, 9, 10, 11
77	15/06/99	Norm	*	6.5	18.18	97.51	69	230	120	11.85	2, 3, 4, 5, 10, 11, 12
78	21/06/99	Norm	Michoacán	6.3	18.15	101.72	54	310	245	3.06	1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 10, 11
79	30/09/99	Norm	Oax. Central1	7.4	15.95	97.03	55	440	145	7.8	2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12
80	21/07/00	Norm	*	5.9	18.09	98.97	47	140	165	13.09	2, 3, 7, 9

¹ Sísmos usados para calcular espectros de Fourier en CU (capítulo 2)² Sísmos usados para calcular relaciones espectrales promedio utilizando los espectros de Fourier en zona de lomas (capítulo 2 y 3)³ Sísmos usados para calcular relaciones espectrales promedio utilizando espectros de respuesta (capítulo 2 y 3)⁴ Sísmos usados para calcular relaciones espectrales promedio entre la estación CU y la estación 54 (capítulo 3)⁵ Sísmos usados para calcular relaciones espectrales promedio entre la estación CU y la estación 49 (capítulo 3)⁶ Sísmos usados para calcular relaciones espectrales promedio entre la estación CU y la estación SCT (capítulo 3)⁷ Sísmos usados para calcular relaciones espectrales promedio entre la estación CU y la estación CD (capítulo 3)⁸ Sísmos usados para calcular tasa de probabilidad de excedencia en la estación CU (capítulo 5)⁹ Sísmos usados para calcular tasa de probabilidad de excedencia y espectros de respuesta en CD (capítulo 5)¹⁰ Sísmos usados para calcular espectros de respuesta en estación 54 (capítulo 5)¹¹ Sísmos usados para calcular espectros de respuesta en estación 49 (capítulo 5)¹² Sísmos usados para calcular espectros de respuesta en estación SCT (capítulo 5)

De los datos en la Tabla 2.1 se destacan los siguientes sismos: el evento 12, que es el sismo de Michoacán, es de particular importancia debido a la intensidad y efectos destructivos que tuvo en la ciudad de México. De este evento se obtuvieron pocos registros, pero que produjeron información relevante para estudiar el comportamiento no lineal del suelo del valle de México.

Los Eventos 17, 36, 50 y 52 son sismos moderados de subducción que tienen aproximadamente igual distancia al epicentro y que producen movimientos fuertes en la Ciudad de México. Estos datos son confiables y útiles para casi todos los propósitos.

El Evento 53 es también un sismo relativamente grande y aislado, que ocurrió justamente 36 horas después del Evento 12 y produjo solo un registro muy corto en zona de lomas y dos registros en zona de lago. Por lo tanto, los datos de este sismo deben usarse cuidadosamente y no son incluidos en los cálculos presentados aquí.

Un especial énfasis se hace acerca de los Eventos 45, 77, 79 y 80 (sismos de falla normal) que resultan pequeños pero bien registrados en gran parte de las estaciones del valle de México. Las relaciones de estos eventos pueden reflejar diferentes patrones de amplificación en la ciudad, que deben ser atribuidas al origen o a la corta distancia epicentral; esto se analizará en el capítulo 3 de este trabajo.

A continuación se describe cómo varían los EAF en CU debido a la región sismogénica (figura 2.3) a la que cada sismo pertenece. La finalidad de estudiar el contenido de frecuencias (EAF) dividiéndola en diversas regiones sismogénicas es que, aparte de considerar que cada región tiene diferentes periodos de recurrencia para una magnitud máxima, este esquema da una mejor caracterización del movimiento. Con ello se puede establecer que existen claras diferencias del tipo de movimiento sísmico que origina un evento en cada una de las brechas. Es decir, si un sismo de magnitud $M=8$ proviene de la brecha San Marcos el movimiento sísmico será distinto a un sismo que proviene de la brecha de Ometepec con la misma magnitud, ya sea porque el contenido de frecuencias es mayor en uno que en el otro ante un sismo de similar magnitud pero de distinta brecha sísmica o porque la frecuencia máxima en donde se presenta la mayor amplitud es diferente de una región a otra. Esto nos permite conocer que una región sismogénica y la magnitud del evento afecta en mayor parte a una estructura u otra como se verá a continuación.

En la *brecha de Michoacán* se generó el evento sísmico del 19 de septiembre de 1985 (Evento 12) de subducción que, como se mencionó antes, causó graves daños en la ciudad de México. Las intensidades de este evento 12 están asociadas a un periodo de retorno aproximadamente de 125 años, y presentó la amplitud máxima del EAF en terreno firme de la ciudad de México para una frecuencia alrededor de 0.5 Hz. Además se generó el sismo del 30 de abril de 1986 (Evento 15) de subducción, las intensidades que presentó este evento en la ciudad de México son consideradas como intensidades de servicio (capítulo 5). La amplitud máxima del EAF de este evento es de 0.1 m/s y se presentó para una misma frecuencia que el anterior de alrededor de 0.5 Hz. Como se puede observar en la figura 2.3, en esta región se producen pocos sismos pequeños y puede dar lugar a sismos de gran tamaño como el de 1985. El periodo de recurrencia en esta zona es aproximadamente de 70 años, con este periodo alto pueden ocurrir en esta región sismos de gran magnitud $M=8.4$ (Pérez *et al.* 1997),

En la figura 2.4a se observa cómo la amplitud de los EAF de los eventos 12, 15 y 68 de origen de subducción a una distancia epicentral promedio de 430 km, con un azimut con respecto a CU de 250° crecen conforme la magnitud aumenta, alcanzando la máxima amplitud para una frecuencia

aproximada de 0.5 Hz, es decir, que para estructuras con periodo estructural alrededor 2.0 s en terreno firme de la ciudad de México se presentan las mayores intensidades.

En la figura 2.4b se observan los EAF de los sismos de falla normal de diferente magnitud (eventos 67, 75, 78 y 76) a una distancia epicentral de 400, 310, 310 y 250 km respectivamente con respecto a CU. En esta figura se observa cómo la frecuencia donde se presenta la máxima amplitud disminuye conforme la distancia epicentral aumenta. También cómo la amplitud aumenta conforme la magnitud crece. Además para estos eventos de falla normal, para frecuencias mayores de 1.0 Hz, la amplitud es aproximadamente la misma. En cambio para los sismos de subducción como se observa en la figura 2.4a la amplitud aumenta aún para frecuencias de 1.0 Hz.

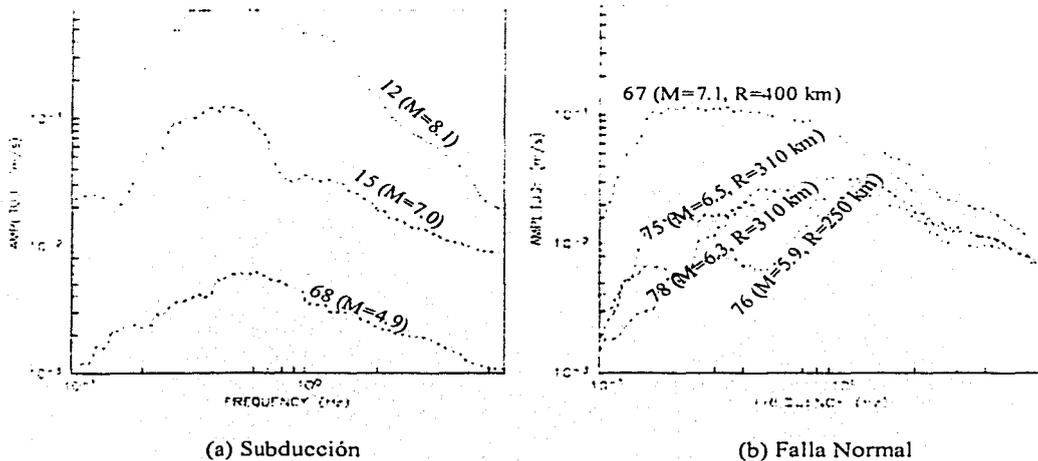


Figura 2.4 Espectros de Amplitudes de Fourier para Michoacán dirección EW

En la brecha de Petatlán se presentó el sismo del 14 de Marzo de 1979 (Evento 10) el cual produjo el colapso de la Universidad Iberoamericana en la ciudad de México. Este evento sísmico produjo una amplitud máxima promedio de 0.3 m/s en el EAF para una frecuencia de 0.5 s, es decir, produjo grandes intensidades en estructuras en terreno firme con periodo estructural alrededor de 1.80 s. Además las intensidades generadas por este evento son intensidades en las que no se deberían presentar daño en las estructuras de acuerdo a las nuevas normas técnicas complementarias sísmicas (NTCS-2002).

También es en esta brecha donde se produjo la réplica del sismo de 1985, el sismo del 21 de Septiembre de 1985 (Evento 13). Estos dos eventos se presentan en la figura 2.5. Para ambas componentes se observa que la máxima amplitud se presenta para una frecuencia alrededor 0.5 Hz. También en la figura 2.5 se observa cómo la amplitud máxima de los eventos 62, 16 y 65 a una distancia epicentral promedio de 310 km con respecto a CU crece y la frecuencia pasa de 1 a 2 Hz conforme la magnitud crece.

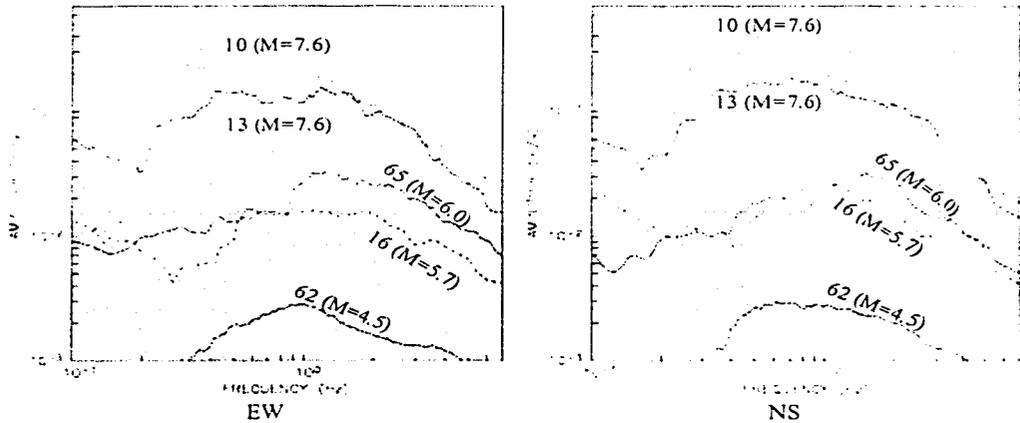


Figura 2.5 Espectros de Amplitudes de Fourier en CU para Petatlán

La región con mayor potencial sísmico es la *brecha de Guerrero*. En esta región (desde Petatlán hasta Acapulco) no se han producido grandes temblores en los últimos 85 años. Se ha encontrado que la energía acumulada en la brecha de Guerrero es suficiente para generar uno ó dos temblores con $M=8.0$, o bien, de 2 a 4 con $M=7.8$. Asimismo, relaciones empíricas entre el área de ruptura y la magnitud indican que esta brecha (con dimensiones máximas de 230 por 80 km) podría generar un temblor de $M=8.3$. (Pérez *et al.* 1997). En la figura 2.6 se puede observar que para los EAF de los eventos 7, 20, 18, 74 y 23, todos de origen de subducción y a una distancia epicentral que varía de 260 a 310 km, la amplitud máxima que alcanza cada evento varía conforme la magnitud aumenta de 4.2 a 7 y la frecuencia en donde ocurre el máximo disminuye de 0.7 a 0.4 Hz respectivamente en ambas direcciones.

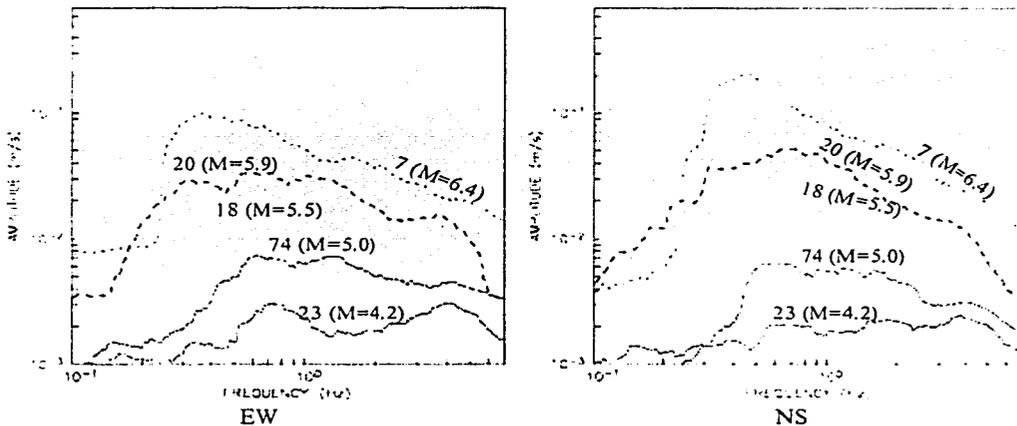


Figura 2.6 Espectros de Amplitudes de Fourier en CU para Guerrero

Otra región con gran potencial sísmico es la *brecha de San Marcos*. En esta región tuvo lugar el sismo del 25 de abril de 1989 (Evento 17), el cual ha sido uno de los últimos más intensos que ha actuado sobre las estructuras de la ciudad después del sismo de 1985. Las intensidades que presentó está asociado a un periodo de retorno de 10 años (Reyes, 1999). Este evento presenta una amplitud de 0.2 m/s para una frecuencia de alrededor de 0.5 Hz (figura 2.7).

En la figura 2.7 se observan los EAF de los eventos 17, 8, 49 y 70 de origen de subducción a una distancia epicentral de 270 km con respecto a CU. En esta figura se observa cómo la frecuencia donde ocurre la amplitud máxima disminuye de 1.0 a 0.4 Hz y la amplitud máxima crece conforme aumenta la magnitud del evento sísmico de $M=4.7$ a $M=6.9$.

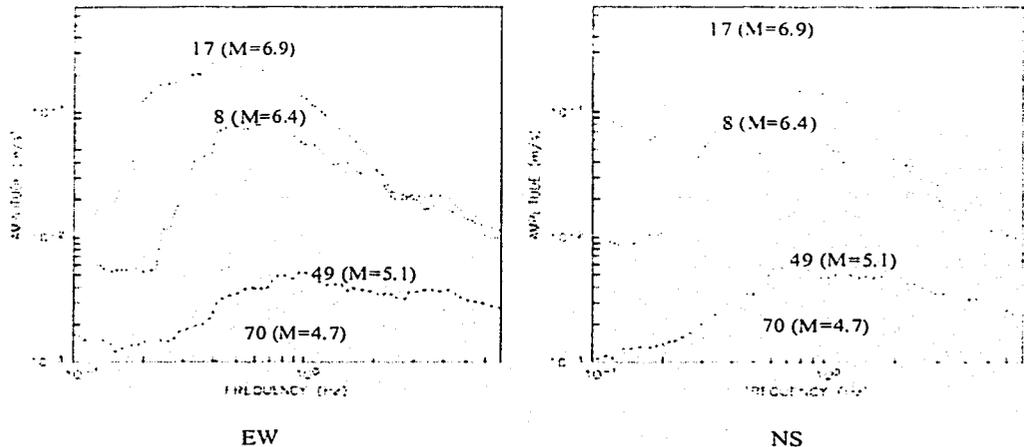


Figura 2.7 Espectros de Amplitudes de Fourier en CU para San Marcos

La *brecha de Ometepepec* tiene los periodos de recurrencia más cortos (de 20 a 30 años). Esto se puede observar en la figura 2.3, donde se puede apreciar que se han registrado una gran cantidad de sismos, lo cual ha permitido la liberación de energía en sismos de menor magnitud. En 1937 y 1950 ocurrieron grandes sismos con $M>7.8$. El 7 de junio de 1982 se generaron dos temblores con $M=6.9$ y 7.0 en un lapso de 6 horas conocidos como el "doble de Ometepepec". También en esta brecha se originó el evento 52 (14/sep/1995) cuyas intensidades provocadas en la ciudad de México son consideradas como intensidades de servicio, es decir, que los edificios ante este tipo de intensidades no deben sufrir daño (capítulo 5). La amplitud promedio máxima del evento 52 en CU es de 0.08-0.2 m/s para una frecuencia de 0.4 Hz.

En la figura 2.8 se observan los eventos 52, 36, 28, 60, 55, 56 y 43 que tienen una distancia epicentral de 260, 300, 300, 350, 330 y 330 km con respecto a CU, es decir, que se pueden considerar que están a una misma distancia aproximadamente. En esta figura se observa claramente cómo la frecuencia a la que ocurre la amplitud máxima en el EAF disminuye de 1.0 a 0.4 Hz conforme crece la magnitud de 4.4 a 7.6 para ambas componentes NS y EW. Es decir, que los sismos que se generan en esta brecha

dependiendo de la magnitud pueden afectar a una estructura u otra de manera más apreciable en terreno firme de la ciudad de México. Por ejemplo los sismos con magnitud $M < 5.5$ afectan a estructuras con periodo estructural alrededor de 1.1 s y los sismos con magnitud $5.5 < M < 7.4$ provocan mayores intensidades en las estructuras con periodo estructural alrededor de 3 y 1.4 s.

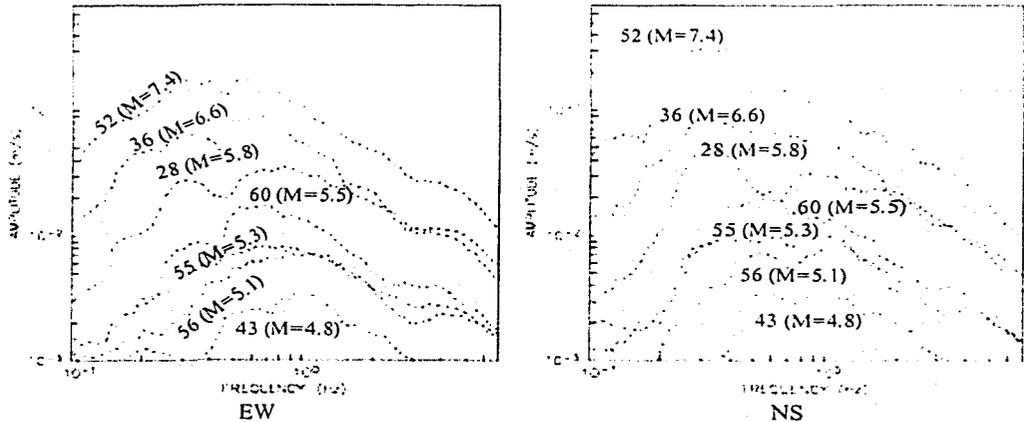


Figura 2.8 Espectros de Amplitudes de Fourier para Ometepec

Como se puede observar se determinaron los espectros de amplitudes de Fourier (EAF) para algunas regiones sismogénicas, y se observaron algunas diferencias entre una zona y otra. Pero para que tengan un uso ingenieril, estos resultados, es necesario realizar estudios más profundos por ejemplo sobre las variaciones que existen en la frecuencia donde se presenta la máxima amplitud conforme aumenta la magnitud. Sobre la forma en que varía el EAF dependiendo el origen del sismo y la distancia a la que se presenta.

A continuación, en el inciso 2.3.2, se estudiarán los EAF sin tomar en cuenta la región sismogénica a la que pertenece el evento sísmico, pero sí observando las diferencias que existen entre el EAF de un sismo de falla normal y subducción. Esto se hace con la finalidad de obtener EAF que en un capítulo posterior nos ayudaran a obtener relaciones de amplificaciones para observar si existen algunas diferencias en los efectos de amplificación entre un tipo de sismos y otro.

2.3.2 Espectros de Fourier en CU sin considerar zonas sismogénicas

Reinoso y Ordaz (1999) demuestran que para nuestros propósitos ingenieriles, las diferencias observadas en los EAF entre los sitios de lomas en la ciudad no son importantes, pero que cuando se calculan amplificaciones empíricas o relaciones de espectros, pequeñas diferencias pueden ser significativas en los cocientes y se debe ser cuidadoso en la elección del sitio de referencia.

Esto se aprecia en la figura 2.9, donde se presentan cálculos para la componente norte-sur del movimiento para el evento 52 (Tabla 2.1) en todos los sitios de lomas. En ella se muestran dos grupos de estaciones que siguen el mismo comportamiento: el suroeste (SW) y el grupo del Norte; este último

tiene considerablemente menor amplitud que el anterior. Esto puede ser debido a los efectos de sitio a los que pertenecen las estaciones del grupo SW que están localizados sobre depósitos recientes de la era cuaternaria, mientras que las estaciones del Norte están sobre depósitos Terciarios que son más viejos. También, Reinoso y Ordaz (1999) muestran que al usar sitios SW como movimientos de referencia para calcular relaciones de espectros, se obtienen resultados más confiables porque los depósitos del lago están en contacto directo con estos estratos.

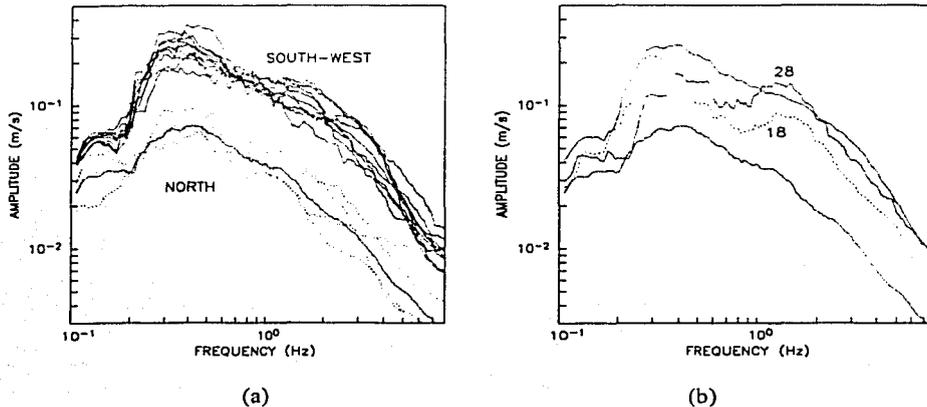


Figura 2.9 Espectros de amplitud de Fourier en sitios de zona de Lomas durante el Evento 52 (14/sep/95, subducción)

Existen dos estaciones situadas entre estos dos grupos, 18 y 28, sobre el Cerro de la Estrella y el cerro del Peñón, respectivamente (figura 2.1), que muestran una respuesta con características mixtas de los dos grupos; esto sucede porque estos sitios están localizados sobre depósitos de lava volcánica apoyada sobre una capa terciaria. El espectro de estas dos estaciones se muestra en la figura 2.9b junto con el promedio de los grupos espectrales SW y Norte. La Estación 21, en la zona de lomas oeste (figura 2.1) está localizada sobre un relleno artificial y por lo tanto las amplificaciones del suelo en este sitio sufren modificaciones al pasar de un estrato a otro. Por estas razones y a pesar que pertenece al grupo SW, Reinoso y Ordaz mencionan que no debe ser tomada en cuenta para el cálculo del promedio espectral. En conclusión, se considera apropiado tomar el promedio espectral de sitios SW como un movimiento de referencia confiable para calcular relaciones de espectros debido a que existe mayor número de estaciones que hace que la desviación estándar sea menor a considerar cualquier otra combinación.

2.3.3 Promedio de espectros de Fourier de subducción y falla normal

En la Tabla 2.1 se menciona que los eventos que están marcados con el número 2 serán utilizados para la determinación de promedios de EAF en zona de lomas como referencia del movimiento, para predecir efectos de amplificación en zona de transición y lago debidos a sismos de subducción y falla normal (ver capítulo 3). La localización de cada evento se muestra en la figura 1.1 y 2.3.

En la figura 2.10 se muestran los EAF en el SW del valle de México para cada uno de los eventos marcados con el número 2 en la Tabla 2.1. En la figura 2.10a se muestran los espectros calculados para sismos con aproximadamente la misma distancia epicentral, donde el efecto de la magnitud es notorio. En esta se observa como la amplitud crece y la frecuencia disminuye conforme la magnitud del evento sísmico aumenta. Y en la figura 2.10b se muestran los mismos espectros de la figura 2.10a (líneas delgadas) junto con espectros de los eventos 45, 53, 77, 79, 80 que tienen diferentes distancias epicentrales y origen que los sismos mostrados en la figura 2.10a. En esta figura se observa que aunque el evento 53 (09/oct/95) tiene una gran magnitud ($M=8$), debido a la distancia epicentral no muestra una gran amplitud, mientras que otros eventos, mucho más pequeños en magnitud, tienen mayores amplitudes para $f > 0.6$ Hz. Como sucede con el evento 35 (10/sep/93) que tiene una gran amplitud, aún mayor que el evento 12 (19/sep/85), para alta frecuencia. Esto explica porque los sismos de falla normal producen mayor movimiento en sitios de lomas y transición que los sismos de subducción. También en la figura 2.10 en general se observa que existe mucha diferencia en los valores de amplitud en frecuencias pequeñas conforme aumenta la magnitud del sismo, siendo esta diferencia menor para frecuencias grandes.

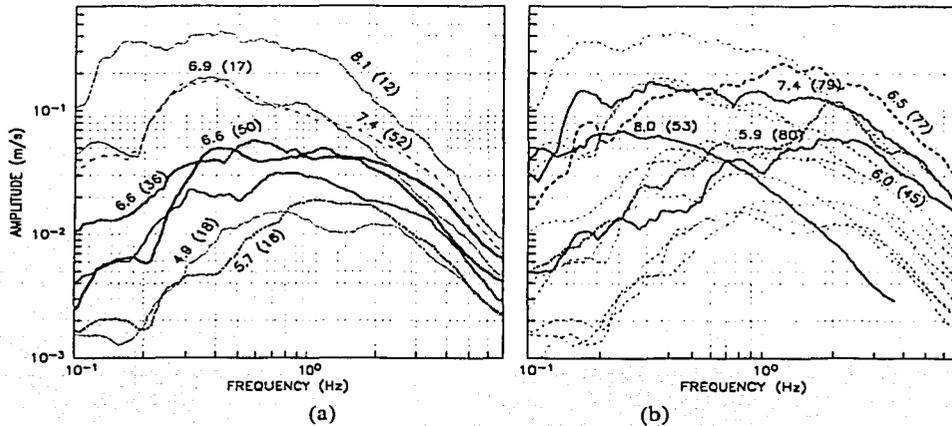


Figura 2.10 Promedio de espectros de amplitudes de Fourier

- (a) Eventos con misma distancia epicentral
(b) Eventos con diferente distancia epicentral

En las siguientes figuras, 2.11 a 2.14, se muestran los promedios de los EAF en zona de lomas debido a sismos de falla normal obtenidos para los eventos 45, 77, 79 y 80 (componente norte-sur y este-este) de la Tabla 2.1. En la figura 2.11 se muestra el promedio obtenido de EAF debido al evento 79 (30/sep/99) en zona de lomas en la ciudad de México. Este evento de falla normal causó daños en la ciudad de Oaxaca, así como a otras poblaciones circundantes al epicentro. En esta figura se muestran los dos grupos de estaciones que siguen el mismo comportamiento observado: el suroeste (SW) en la parte superior y el grupo del Norte en la parte inferior con las características que anteriormente se describieron. También se observa que tienen el mismo comportamiento de movimiento en ambas direcciones ya sea norte-sur (NS) o este-oeste (EW). Este evento 79 aunque es de origen de falla

normal su comportamiento se asemeja al de un sismo de subducción, es decir, que la mayor amplitud permanece aproximadamente constante para frecuencias entre 0.2 y 3.0 Hz.

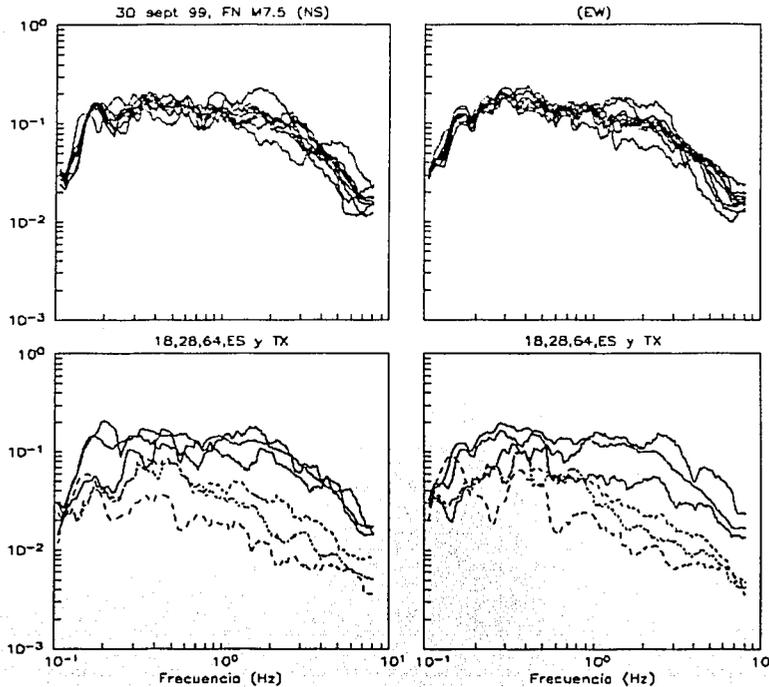


Figura 2.11 Espectros de Fourier obtenidos para el evento 79 (30/sep/99, falla normal)

En la figura 2.12 se muestra el evento 77 (15/jun/99), pero solamente el promedio espectral de los sitios del SW. Este evento de falla normal de magnitud moderada se originó en Tehuacán, Puebla (ver figura 2.2). Causó gran alarma y considerable daños en pueblos localizados dentro de un radio de 50 km del epicentro. Se sintió en ocho estados, incluyendo el D.F. En la figura 2.12 se observa cómo la amplitud crece ligeramente conforme la frecuencia aumenta de 0.1 Hz hasta el máximo en una frecuencia de 2 Hz.

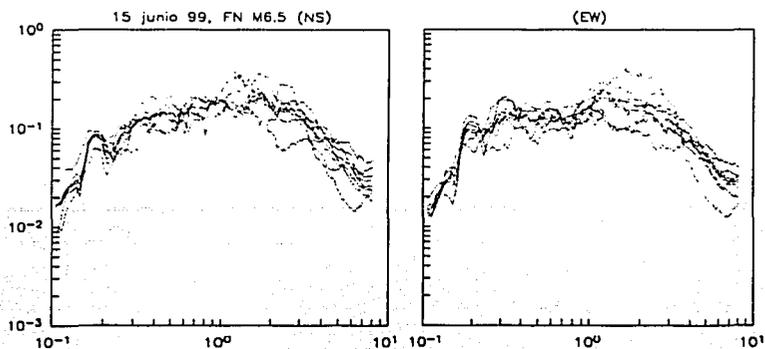


Figura 2.12 Espectros de Fourier obtenidos para el evento 77 (15/jun/99, falla normal)

En la figura 2.13 se observan los promedios de los EAF en zona de lomas para la ciudad de México del evento 80 (21/jul/00). Este evento de falla normal se originó en Copalillo, aproximadamente a 65 km al sureste de Iguala y a 140 km de Ciudad Universitaria. En esta figura se observa claramente cómo la amplitud es mayor para frecuencias altas, alcanzando el máximo en 2.0 Hz.

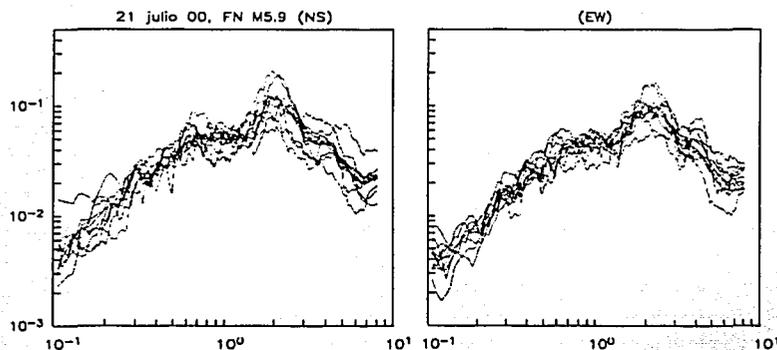


Figura 2.13 Espectros de Fourier obtenidos para el evento 80 (21/jul/00, falla normal)

En la figura 2.14 se muestran los promedios de los EAF de los sitios SW en zona de lomas para ambos componentes del evento 45 (23/may/94) de origen de falla normal, en la cual se observa también cómo el contenido de frecuencias es mayor para altas frecuencias.

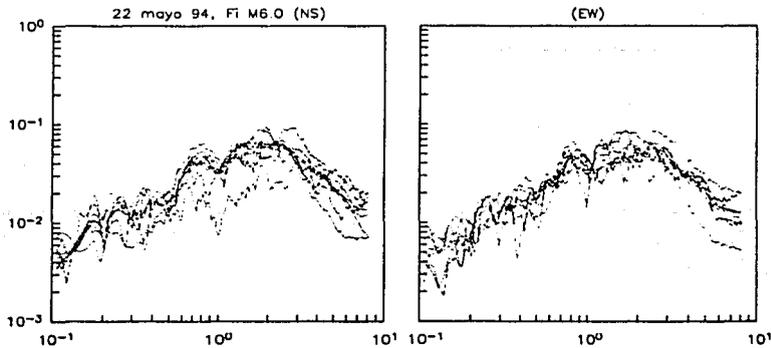


Figura 2.14 Espectros de Fourier obtenidos para el evento 45 (23/may/94, falla normal)

En general, las diferencias que se observaron en estos eventos analizados son las siguientes. El contenido de frecuencias altas es mayor para sismos de falla normal con respecto a las que presentan los sismos de subducción. En los sismos de subducción el contenido de frecuencias es mayor para frecuencias bajas. Por lo tanto los sismos de falla normal son un peligro sísmico para estructuras desplantadas en terreno firme, transición o en suelo con periodo dominante de suelo bajos por el alto contenido de frecuencias altas.

2.3.4 Promedio de espectros de respuesta de subducción y falla normal

En esta parte se calculan espectros de respuesta en sitio de lomas y se obtiene el promedio de estos con la finalidad que a continuación se menciona: Ordaz *et al.* (2000) calcularon espectros de diseño para el Distrito Federal considerando un espectro de peligro uniforme en CU con periodo de retorno T_R , de 125 años. Utilizó funciones de amplificación (FA) en más de 100 sitios instrumentados en la ciudad de México. Estas funciones, que dependen del periodo T , son el promedio de los cocientes entre ordenadas del espectro de respuesta en el sitio de interés y el sitio CU.

En esta parte adoptamos el mismo principio de Reinoso y Ordaz (1999) de usar como promedio los sitios del suroeste (SW) de terreno firme de la Ciudad de México, pero en lugar de calcular promedios de EAF se calculan promedios de espectros de respuesta (ER) para un porcentaje de amortiguamiento crítico del 5% en zona de lomas (Arciniega *et al.* 1993). Estos promedios de ER serán usados más adelante para calcular funciones de amplificación en 66 sitios del valle de México con respecto a zona de lomas esto con la finalidad de encontrar si existen diferencias entre los sismos de subducción y los sismos de falla normal (ver capítulo 3). También, las FA así obtenidas se usarán para vislumbrar algunos escenarios que se pueden presentar en el futuro (ver capítulo 4) y finalmente nos ayudarán a determinar cuáles serían las aceleraciones para diferentes periodos de retorno (ver capítulo 5).

En la figura 2.15 se muestra el espectro de respuesta promedio del evento 17 (25/abr/89) de origen de subducción (línea más gruesa) calculado para zona de lomas. En esta figura se observa que existen diferencias en el ER entre los diferentes sitios de zona de lomas en este evento. Para periodos estructurales alrededor de 0.8 s, así como para periodos alrededor de 2.5 s se nota una mayor dispersión que para otros periodos.

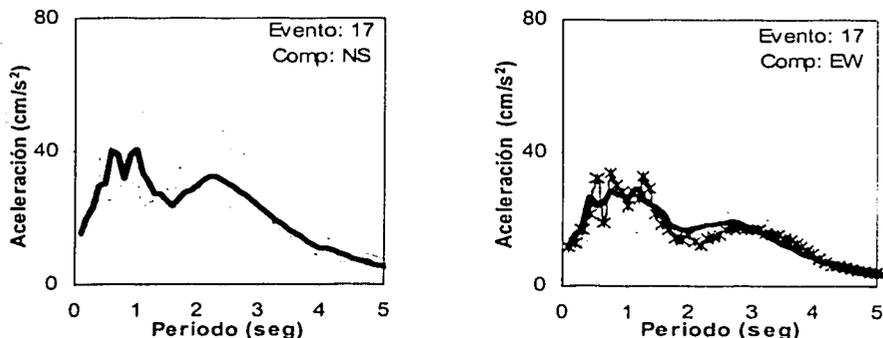


Figura 2.15 Espectros de respuesta obtenidos para el evento 17 (25/abr/89, Subducción)

En la figura 2.16 se muestra el promedio de ER con línea gruesa para el evento 77 (15/jun/99) de origen de falla normal de la Tabla 2.1, obtenido a partir de los espectros en sitios SW. En esta figura se observa que las diferencias son solamente para periodos alrededor de 0.5 s, que es donde este tipo de sismos puede provocar un mayor daño a estructuras en terreno firme con periodo alrededor de 0.5 s, y para el resto de los periodos no se observan dispersiones importantes de las aceleraciones con respecto al promedio.

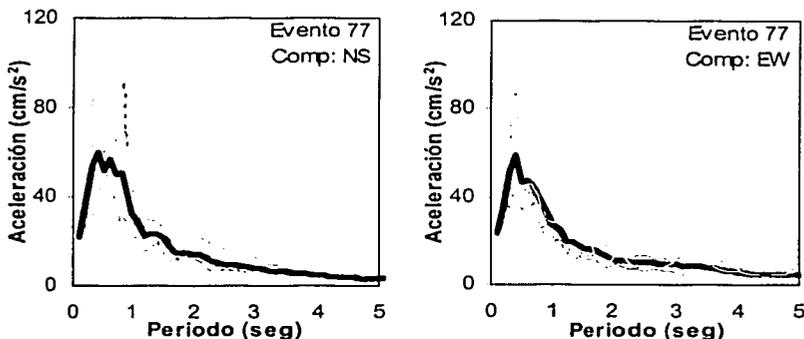


Figura 2.16 Espectros de respuesta promedio obtenidos para el evento 77 (15/jun/99, falla normal)

En la figura 2.17 se muestra el promedio de ER del evento 79 (30/sep/99) de falla normal. Este evento, como anteriormente se había mencionado, era similar a un sismo de subducción al observar su EAF. Pero al observar esta figura nos damos cuenta que para periodos menores de 0.5 s es donde existe una mayor dispersión, que es donde un sismo de falla normal puede provocar mayores daños a estructuras desplazadas en terreno firme, transición o periodos de suelo bajos.

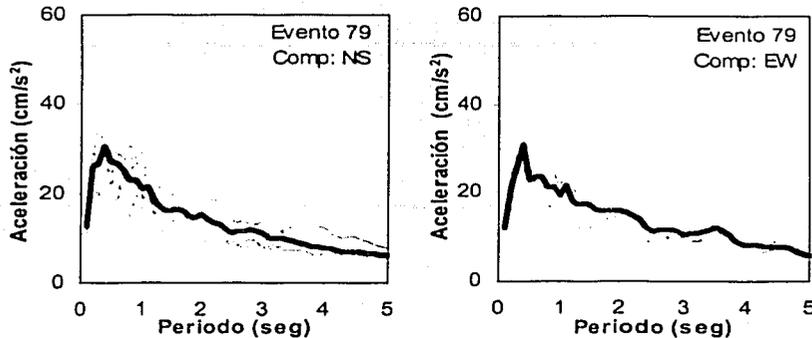


Figura 2.17 Espectros de respuesta obtenidos para el evento 79 (30/sep/99, falla normal)

Para la figura 2.18 que corresponde al evento 80 (21/jul/00) de origen de falla normal nuevamente se observa que la dispersión del promedio de los ER en zona de lomas SW es mayor para periodos alrededor 0.5 s y que para el resto de los periodos estructuras se mantiene estable.

En conclusión se puede decir que para sismos de falla normal la dispersión de aceleraciones espectrales con respecto al promedio de ER en zona de lomas SW es grande para periodos alrededor de 0.5 s. Y para sismos de origen de subducción existe una mayor dispersión para periodos alrededor de 0.5, de 2.0 y de 3.0 s, además que para periodos mayores de 4 s es donde se comienza a notar que existe una menor dispersión de las aceleraciones espectrales con respecto al promedio.

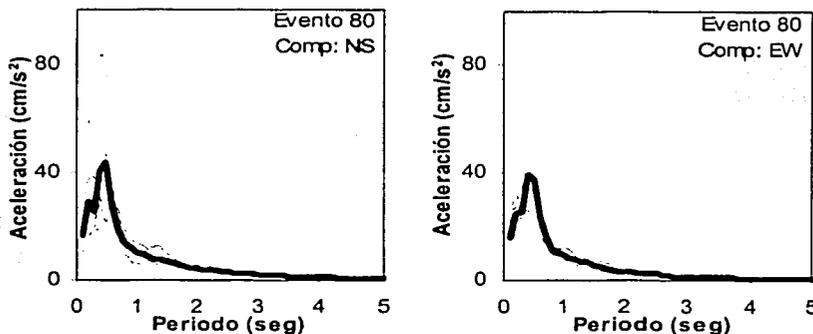


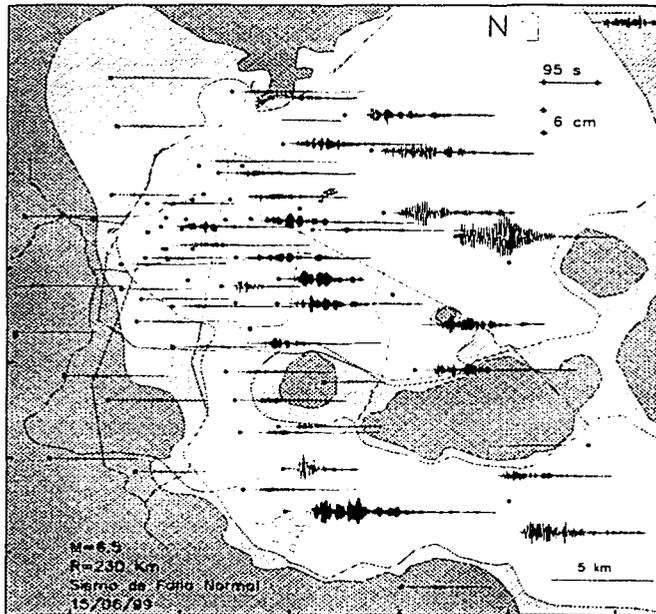
Figura 2.18 Espectros de respuesta obtenidos para el evento 80 (21/jul/00, falla normal)

A continuación se presentan los desplazamientos debido a dos sismos de falla normal. En esta parte se observará el enorme contraste del movimiento entre los sitios de zona de lomas y lago. Así también, nos permite denotar la importancia que tienen los efectos de amplificación en la ciudad de México, lo cual se abordará en el siguiente capítulo de este trabajo.

2.4 Desplazamiento del suelo en el valle de México

Las ondas sísmicas provenientes de las diferentes regiones sísmicas se atenúan en el trayecto hacia la ciudad de México (figura 2.2); sin embargo al internarse en el valle de México y en particular en los estratos blandos, se presenta una importante amplificación de las ondas y un significativo incremento en la duración del movimiento.

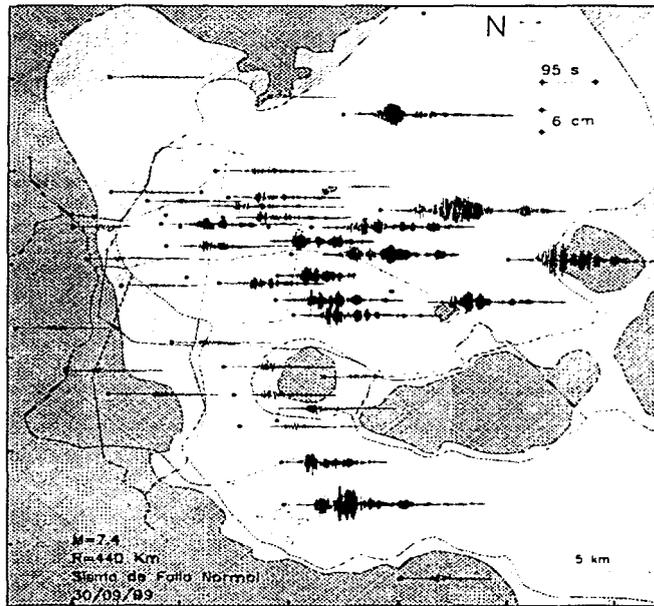
Al llegar estas ondas sísmicas al valle de México se manifiestan de manera dramática los efectos de amplificación dinámica en depósitos lacustres. Esta amplificación se debe al entrapamiento de ondas por el contraste entre las características dinámicas de los depósitos superficiales y la roca basal. En el dominio de la frecuencia, la forma y amplitud de esta amplificación están controladas por el contraste de impedancias elásticas, el amortiguamiento del suelo, las características de la acción de incidencia y de la geometría del valle. En el dominio del tiempo la respuesta se manifiesta en movimientos largos y armónicos y en las grandes amplitudes de los registros. Las características del sitio de amplificación en el valle y el contraste del movimiento entre los sitios de zona de lomas y lago pueden ser apreciados en la figuras 2.19a y 2.19b.



(a) Sismo de 15/06/99 (falla normal)

Figura 2.19 Desplazamientos norte-sur en la ciudad de México

En estas figuras se presentan los desplazamientos del terreno calculados en las tres zonas geotécnicas del valle en la componente este-oeste de los eventos sísmicos del 15/06/99 (Evento 77) y del 30/09/99 (Evento 79) ambos de origen de falla normal para cada sitio en donde se registró el movimiento, junto con las zonas geotécnicas y algunas referencias. Estas gráficas permiten comparar los desplazamientos de un modo directo y cualitativo, tan adecuado como enfatizar la importancia de la topografía y características del valle en la amplificación y duración del movimiento. Se puede apreciar de manera clara la extensa duración de las señales dentro de la zona de lago comparada con las que se presenta en terreno firme. Así también, se puede distinguir que la duración total de algunos registros es del orden de 300 segundos y aproximadamente de 150 segundos de etapa intensa para la zona de lago noreste de la ciudad; lo que sorprende es que estos dos eventos presentan aproximadamente la misma forma en cada uno de los registros a pesar que provienen de diferentes lugares.



(b) Sismo de 30/09/99 (falla normal)

Figura 2.19 (Continuación)

Capítulo 3

Amplificación en el valle de México debido a sismos de subducción y de falla normal

En el capítulo anterior se mostró la importancia que tienen los sismos de subducción y falla normal, así como cuáles han sido algunos de los efectos que se pueden esperar en zona de lomas y qué sucede con los desplazamientos del suelo en el valle de México. En este capítulo se trata de encontrar si existen diferencias entre la amplificación de los sismos de falla normal y subducción. Esto se realizará analizando los cocientes espectrales obtenidos a partir de la relación entre los promedios de espectros de amplitudes de Fourier (EAF) en zona de lomas y los EAF en 66 sitios del valle de México, así como también con ayuda de los promedios de los espectros de respuesta (ER) en zona de lomas y los ER en 66 sitios de la ciudad de México. Se observará si existen diferencias entre un sismo y otro en los efectos de amplificación. Por último, se observará para algunas estaciones del valle de México si existen diferencias entre tomar exclusivamente el cociente espectral en CU y el promedio de zona de lomas.

3.1 Cocientes Espectrales de zona de lago con respecto a la de lomas

Utilizando la técnica de los cocientes espectrales o funciones de transferencia, los datos de la red acelerométrica han servido, entre otras cosas, para medir la amplificación relativa de los sitios en zonas de lago y transición con respecto a los del terreno firme (Singh et al., 1988 y Reinoso y Ordaz, 1999). El cociente determinado a partir de EAF representa la amplificación medida en el dominio de la frecuencia y refleja las características dinámicas del sitio, entre ellas el periodo o frecuencias dominantes. Y el cociente determinado a partir de ER representa solamente una relación que existe entre un sitio y otro para cada periodo estructural, pero realmente no tiene una interpretación física.

En la Tabla 3.1 se presentan los registros de las estaciones que se utilizaron de cada evento mencionado en la Tabla 2.1 marcada con los números 2 y 3 para calcular los cocientes de espectros. En ella se indica además el valor del periodo dominante del sitio (Ts) en que se localiza cada estación.

Tabla 3.1 Registros utilizados en este capítulo 3 y los periodos dominantes de cada estación

ESTACIÓN	TIPO DE SUELO	Ts	19/09/85	25/04/89	24/10/93	10/12/94	14/09/95	23/05/94	15/06/99	30/09/99	21/07/00
01	Lago	2.1									
02	Lago	3.1									
03	Lago	1.9									
04	Lago	1.9									
05	Lago	1.9									
06	Lago	2.8									
07	Lomas	0.5									
08	Lago	2.2									
09	Lago	2.5									
10	Lago	2.3									
11	Lago	4.5									
12	Lago	3.8									
13	Lomas	0.5									
14	Lago	3.8									
15	Lago	1.4									
16	Transición	0.6									
17	Lago	1.2									
18	Lomas	0.5									
19	Lago	2.7									
20	Lago	4.9									
21	Lomas	0.5									
22	Lago	1.5									
23	Lago	4.9									
24	Transición	1.1									
25	Lago	2.3									

Tabla 3.1 (Continuación)

ESTACIÓN	TIPO DE SUELO	Ts	19/09/85	25/04/89	24/10/93	10/12/94	14/09/95	23/05/94	15.06/99	30/09/99	21/07/00
27	Transición	0.8									
28	Lomas	0.5									
29	Lago	2.1									
30	Transición	0.5									
31	Lago	5.2									
32	Lago	4.4									
33	Lago	2.6									
34	Lomas	0.5									
35	Lago	5.0									
36	Lago	3.3									
37	Transición	1.1									
38	Lago	1.8									
39	Lago	2.7									
40	Lomas	0.5									
41	Lago	4.1									
42	Lago	4.4									
43	Lago	3.1									
44	Lago	1.3									
45	Lago	2.5									
46	Transición	0.9									
47	Transición	0.5									
48	Lago	2.4									
49	Lago	2.8									
50	Lomas	0.6									
51	Lago	2.2									
52	Transición	0.9									
53	Lago	1.5									
54	Lago	1.1									
55	Lago	1.9									
56	Lago	2.4									
57	Transición	0.9									
58	Lago	2.3									
59	Lago	3.1									
62	Lago	2.1									
64	Lomas	0.5									
68	Lago	3.3									
72	Lago	2.5									
74	Lomas	0.5									
78	Lomas	0.5									
80	Lago	2.8									
84	Lago	1.4									
CD	Lago	2.2									
MI	Lomas	0.5									
MR	Lomas	0.5									
PE	Lago	1									
RD	Lago	1.1									
SC	Lago	1.9									
TU	Lago	5.0									
TV	Transición	0.5									
TV	Lomas	0.5									
VG	Lago	3.0									
CR	Lomas	0.5									
CH	Lomas	0.5									
CV	Transición	0.7									
ES	Lomas	0.5									
IM	Transición	0.8									
RNE	Lago	2.4									
ZA	Lago	4.3									

En las figuras 3.1 a 3.16 se presentan los cocientes de espectros de los eventos mencionados en la Tabla 2.1 y 3.1.

- Las figuras cuya terminación es con un número impar (figura 3.1, 3.3 hasta 3.15) muestran las relaciones agrupadas por su periodo dominante principal, Ts. En cada una de las figuras se muestran para cada estación en el valle de México (figura 2.1) los cocientes obtenidos a partir de EAF de los eventos 45, 77, 80 y 79 (Tabla 2.1) de origen de falla normal. Estos se comparan con las dos columnas últimas de la derecha en la que se muestran las relaciones promedio EW y NS y las desviaciones estándar de los eventos 12, 17, 36, 50 y 52 (Reinoso y Ordaz, 1999) de origen de subducción.
- Las figuras cuya terminación es con número par (figura 3.2, 3.4 hasta 3.16) muestran los cocientes obtenidos a partir de la relación entre el espectro promedio en zona de lomas (ver capítulo 2) y los espectros de respuesta con un 5% del amortiguamiento crítico obtenido para cada estación de zona

de lago donde hubiese sido registrado el evento (Tabla 3.1). En las tres primeras columnas se observan los cocientes espectrales de respuesta (CER) para cada estación debido a los sismos de origen de falla normal de los eventos 77, 80 y 79. Estos se comparan en las dos siguientes columnas la primera con los CER promedios obtenidos a partir de los eventos 12, 17, 36, 50 y 52 de origen de subducción y la segunda con los eventos 77, 79 y 80 de origen de falla normal para ambas componentes EW y NS respectivamente.

Finalmente en la última columna de estas figuras se presentara un promedio de las amplificaciones de los dos componentes NS y EW calculada con la expresión (3.1) considerando los siete eventos antes mencionados, es decir, sismos de subducción y falla normal juntos (marcada con línea continua).

$$CER_p = \left(\frac{CER_{EW}^2 + CER_{NS}^2}{2} \right)^{0.5} \quad (3.1)$$

CER_{EW} es la amplificación promedio (EW) obtenida a partir de los siete eventos (Tabla 3.1)

CER_{NS} es la amplificación promedio (NS) obtenida a partir de los siete eventos (Tabla 3.1)

Así como también otro promedio de los CER en esa misma columna pero obtenida a partir de la siguiente expresión (3.2) (marcada con línea discontinua) en el que se genera el promedio considerando una desviación estándar de cada una de las componentes.

$$CER_{p\sigma} = \left(\frac{CER_{EW\sigma}^2 + CER_{NS\sigma}^2}{2} \right)^{0.5} \quad (3.2)$$

$CER_{EW\sigma}$ es la amplificación promedio más una desviación estándar (EW) obtenida a partir de los siete eventos de la Tabla 3.1

$CER_{NS\sigma}$ es la amplificación promedio más una desviación estándar (NS) obtenida a partir de los siete eventos de la Tabla 3.1

Esta última columna es importante porque los promedios resultantes de la ecuación 3.2 serán usados más adelante para calcular escenarios de riesgo sísmico (capítulo 4) y espectros de aceleraciones para diferentes periodos de retorno (capítulo 5) en el valle de México.

Sitios con $T_s \approx 0.5$ segundos

Las figuras 3.1 y 3.2 muestran las relaciones espectrales para los sitios 30 y 47 calculadas a partir de EAF y ER respectivamente. Estos sitios están localizados en zona de transición (figura 2.1), pero el comportamiento que tienen es similar a los sitios de lomas, con amplitudes máximas de 2. Por lo tanto sería conveniente mover la frontera e incluir estos dos sitios en la zona de lomas. En estas dos estaciones no se observa algún comportamiento que se deba al origen ó al azimut del evento sísmico.

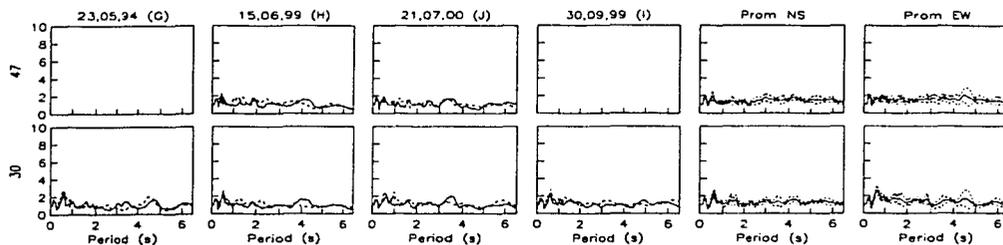


Figura 3.1 Relaciones de espectros para estaciones con $T_s < 0.5$ segundos a partir de EAF

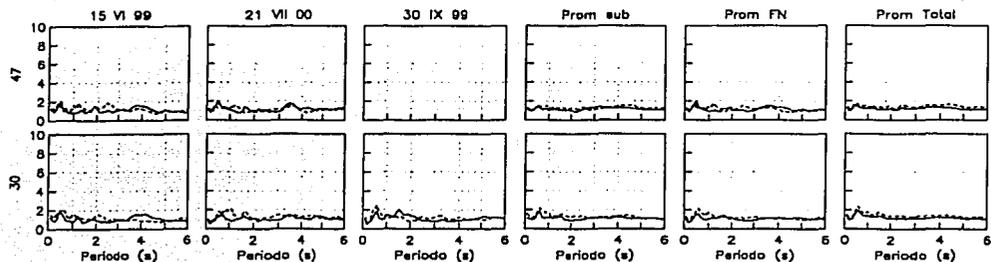


Figura 3.2 Relaciones de espectros para estaciones con $T_s < 0.5$ segundos a partir de ER

Sitios con $0.5 < T_s < 1.0$ segundos

Los sitios con periodo dominante entre 0.5 y 1.0 segundos corresponden a la denominada zona de transición (figura 2.1). Estos sitios muestran aproximadamente el mismo comportamiento de amplificación para todos los sismos. Esto puede ser apreciado en las figuras 3.3 y 3.4 que muestran las relaciones obtenidas a partir de EAF y ER para todas estas estaciones. La amplitud máxima es menor de 9 para la estación 27 con un periodo de suelo (T_s) igual a 0.8 s y para las estaciones 37 y 24 con $T_s = 1.1$ s. Para las estaciones 57, 52 y 46 cuyo $T_s = 0.9$ s la amplitud máxima es menor de 6. Y para las estaciones CY con $T_s = 0.7$, 16 con $T_s = 0.6$ y VI con $T_s = 0.5$ s la amplitud máxima es menor de 4. Se puede observar que la amplitud máxima alrededor del periodo del suelo decrece conforme el periodo del suelo disminuye, debido a que el suelo se aproxima más a ser considerado terreno firme, donde las amplificaciones tienden a ser menores.

Las desviaciones estándar calculadas para los sismos de subducción presentadas en las dos últimas columnas de la figura 3.3, en o cerca del periodo dominante de cada estación son aproximadamente cero. Esto significa que existe poca incertidumbre en el pico del cociente. La estación IM muestra una respuesta muy irregular. Esto puede ser debido a que esta cerca un edificio alto que puede estar afectando la respuesta del sitio, pero esto no ha sido demostrado y se requiere realizar una mayor investigación para estar seguros de ello. En estas estaciones no se observa tampoco algún comportamiento que se deba al origen o al azimut del sismo. En la figura 3.4 correspondiente a los cocientes de ER se aprecia que el promedio de CER debido a sismos de falla normal son un poco menores que para subducción.

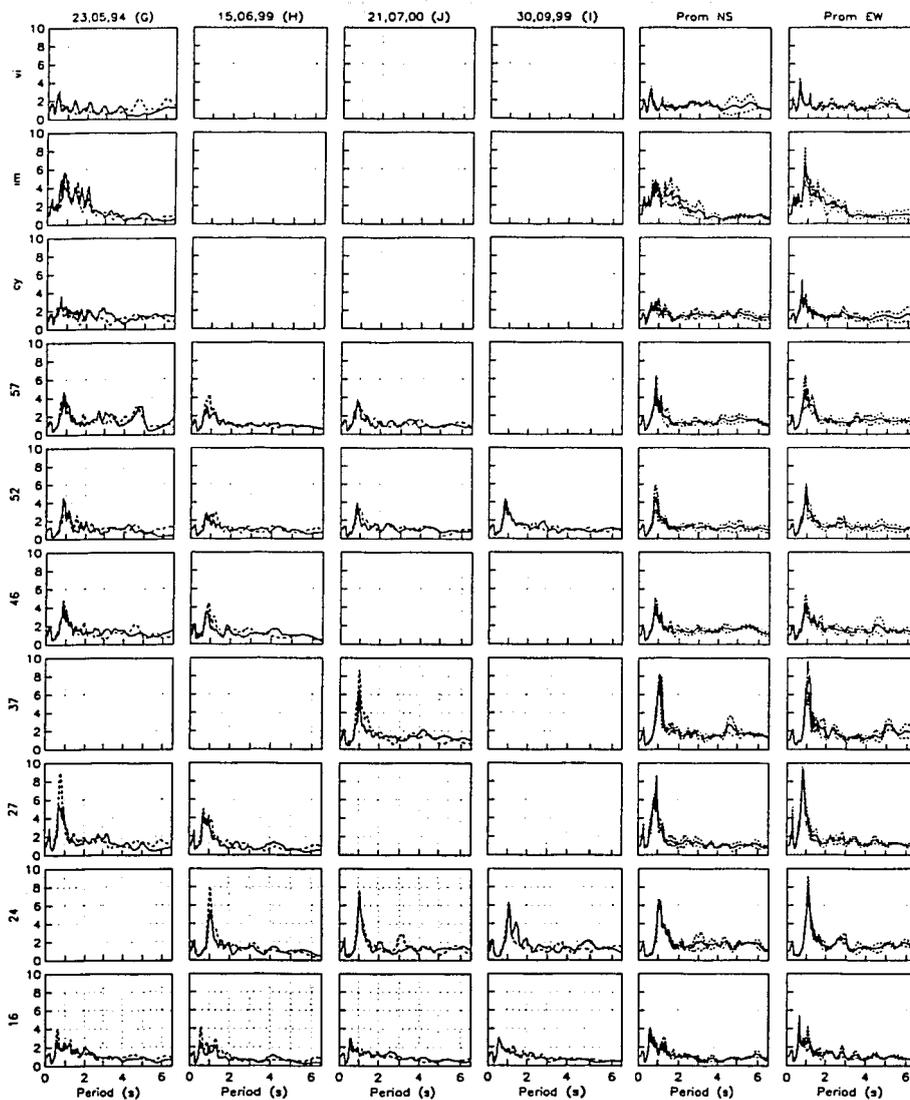


Figura 3.3 Relaciones de espectro para estaciones con $0.5 < T_s < 1.0$ segundos a partir de EAF

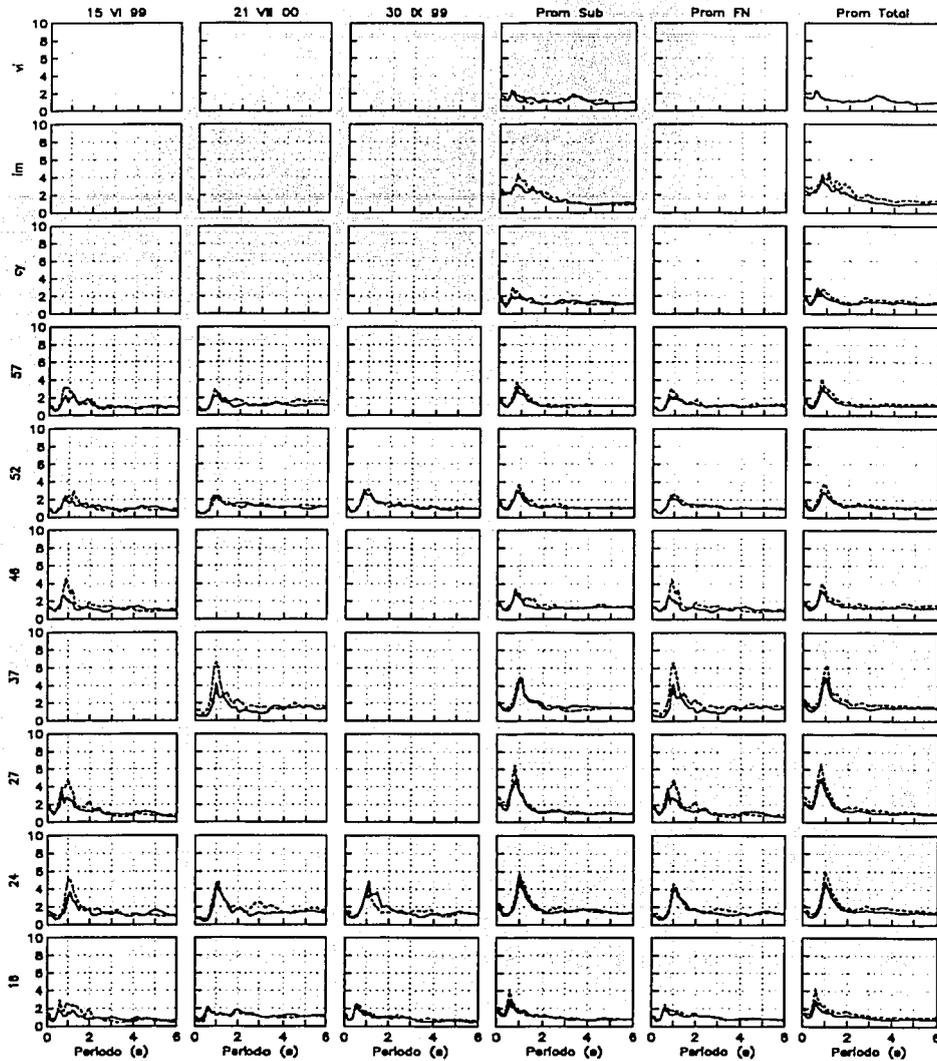


Figura 3.4 Relaciones de espectro para estaciones con $0.5 < T_s < 1.0$ segundos a partir de ER

Sitios con $1.0 < T_s < 1.8$ segundos

Los patrones de amplificación de estos sitios son regulares (figuras 3.5 y 3.6). Existe una área grande de la ciudad con estas características en la que durante el sismo de 1985 numerosas estructuras sufrieron daño.

Entre estos sitios están los localizados entre la zona de lomas donde está CU y el Cerro de la Estrella, como la estación 84 con $T_s=1.4$ y la 22 con $T_s=1.5$ s, que tienen prácticamente la misma relación espectral para todos los eventos. La amplitud media máxima de los cocientes es menor que 18. Algunas posibles evidencias de ondas superficiales generadas por la forma de cañón en la zona del lago pueden ser observadas por la amplificación del movimiento en el componente EW; por ejemplo, entre las estaciones 22 y 53 con un mismo T_s se nota la diferencia de amplificación en la dirección EW ya que es mayor la amplificación para el sitio 22. También para las estaciones 15 y 84 con un mismo T_s , pero con una diferencia de 1.5 veces más grande la amplificación del sitio 84 con respecto al sitio 15. En cambio, para sitios como RO y 44 con un mismo $T_s=1.3$ s, se presenta similitud en la amplificación en ambos componentes. Esto ha sido sugerido anteriormente en un esfuerzo por explicar el daño que ocurrió en estos sitios durante el sismo 1985. En estas estaciones presentadas no se observa algún comportamiento que se deba al origen o al azimut del sismo. En la figura 3.6 correspondiente a los cocientes de espectros de respuesta no se aprecian diferencias a las observadas en la figura 3.5.

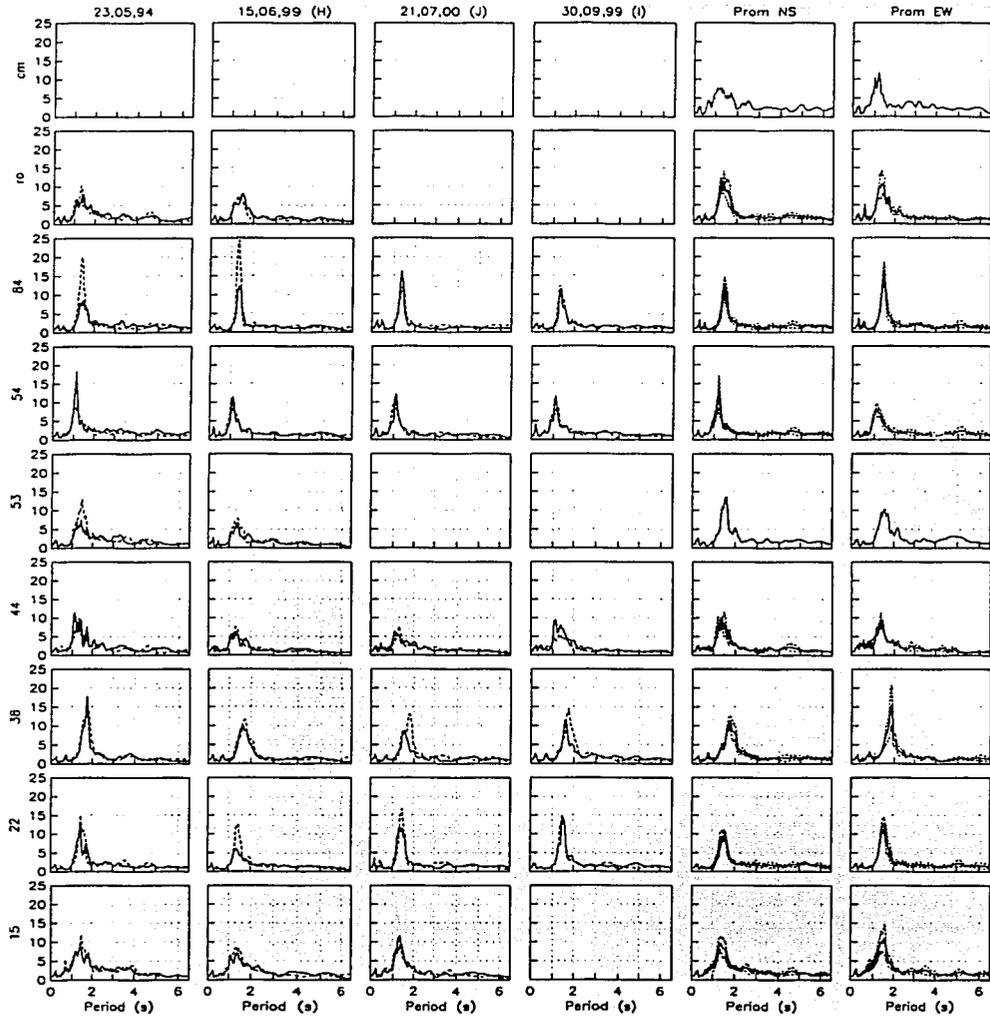


Figura 3.5 Cocientes espectrales para estaciones con $1.0 < T_s < 1.8$ segundos a partir de EAF

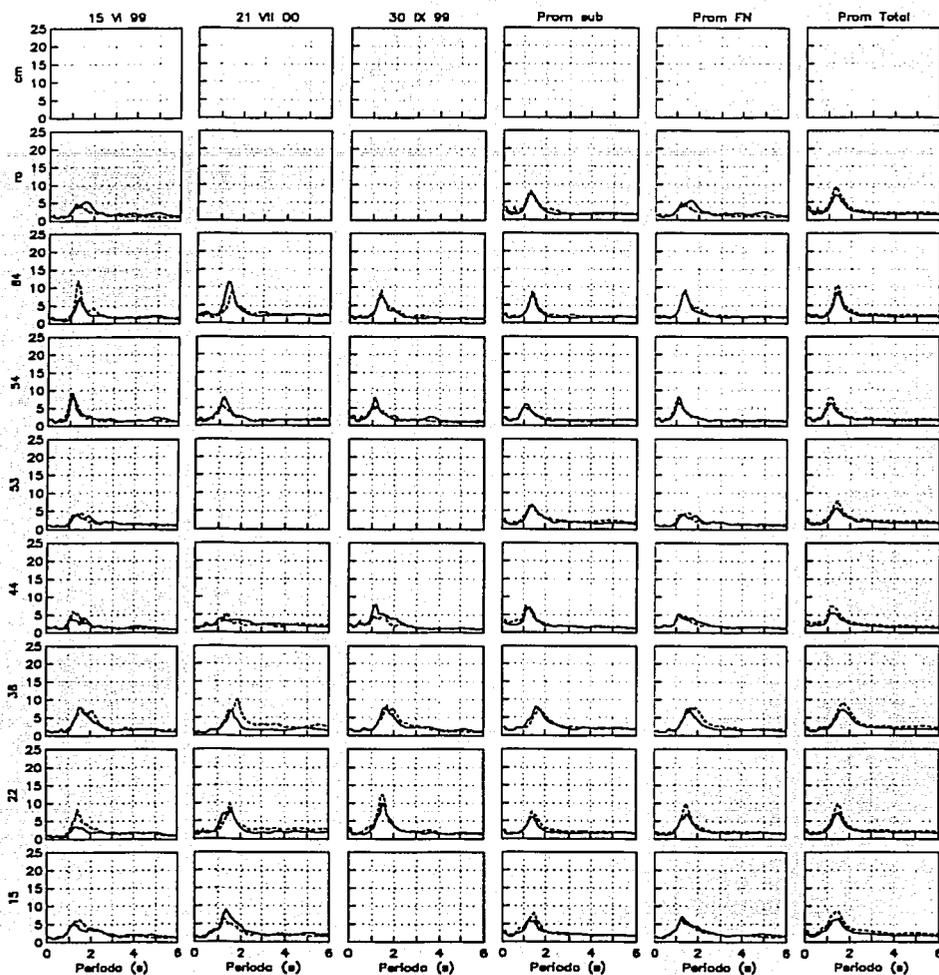


Figura 3.6 Cocientes espectrales para estaciones con $1.0 < T_s < 1.8$ segundos a partir de ER

Sitios con $1.8 < T_s < 2.5$ segundos

Estos sitios están localizados en el centro de la ciudad, donde se han reportado los mayores daños durante movimientos sísmicos (figura 2.1). Estos cocientes tienen una desviación estándar ligeramente mayor (Figura 3.7 y 3.8) comparada con sitios con menor T_s . Algunos de estos cocientes pueden alcanzar una amplificación media máxima de 30.

En la figura 3.7 se puede observar cómo para la mayoría de las estaciones la amplificación máxima en el periodo dominante que se presenta en cada sitio crece conforme el periodo del suelo aumenta de 1.9 a 2.5 s, como los sitios 55, SC, 03, 04 y 05 con $T_s=1.9$ s, los sitios 01 y 62 con $T_s=2.1$ s, los sitios 08 y 51 con $T_s=2.2$ s, los sitios 10, 25 y 58 con $T_s=2.3$ s, el sitio 48 con $T_s=2.4$ s, los sitios 45 y 09 con $T_s=2.5$, donde se observa el aumento de la amplificación de 15 a 30 conforme el periodo del suelo crece. Pero para los sitios 56 con $T_s=2.4$ y 72 s con $T_s=2.5$ s tiende a disminuir la amplificación máxima de 30 a 15 conforme aumenta el periodo del suelo en lugar de aumentar la amplificación como sucede en los otros sitios.

Estas diferencias que se presentan en los sitios se pueden explicar como sigue: la amplificación mayor que se presenta en el sitio 56 con respecto al sitio 48 se puede deber a que existen ruinas prehispánicas enterradas que afectan la respuesta del sitio, modificando la respuesta del mismo. Para el sitio 72 puede posiblemente pasar lo mismo que se este modificando la respuesta porque se encuentra alejado del lugar donde se encontraban la mayoría de los edificios importantes prehispánicos, y la amplificación es menor que en los sitios 09 y 45 que se encuentran más cercanos (figura 3.7).

También en la figura 3.7 se puede observar que para la estación 51 la amplificación en el componente EW es mayor si el evento sísmico proviene del sur. Y para las estaciones 01, 08, 45, 56 y 62 se observa que la amplificación es un poco más grande para el componente NS para el sismo de falla normal del 23/05/94 (Evento 45) que para los eventos 77, 79 y 80 también de falla normal. En estas estaciones no se observa algún comportamiento que se deba al origen del sismo.

Con lo anterior se podría explicar por qué aunque estos sitios tienen aproximadamente el mismo periodo dominante (1.9 a 2.4 s), la amplificación máxima es muy diferente aun para sitios cercanos tales como el 55 y 56, con amplificaciones de 10 y 20, respectivamente. Para la estación 51 se observa que el componente EW es mayor si el evento sísmico proviene del sur. Para las estaciones 01, 08, 45, 56 y 62 se observa que la amplificación es un poco más grande para el componente NS para el sismo de falla normal (Evento 23/05/94) que para los otros eventos.

En la figura 3.8 que consiste en los cocientes generados a partir de espectros de respuestas presentan las mismas observaciones que se generaron en la figura 3.7.

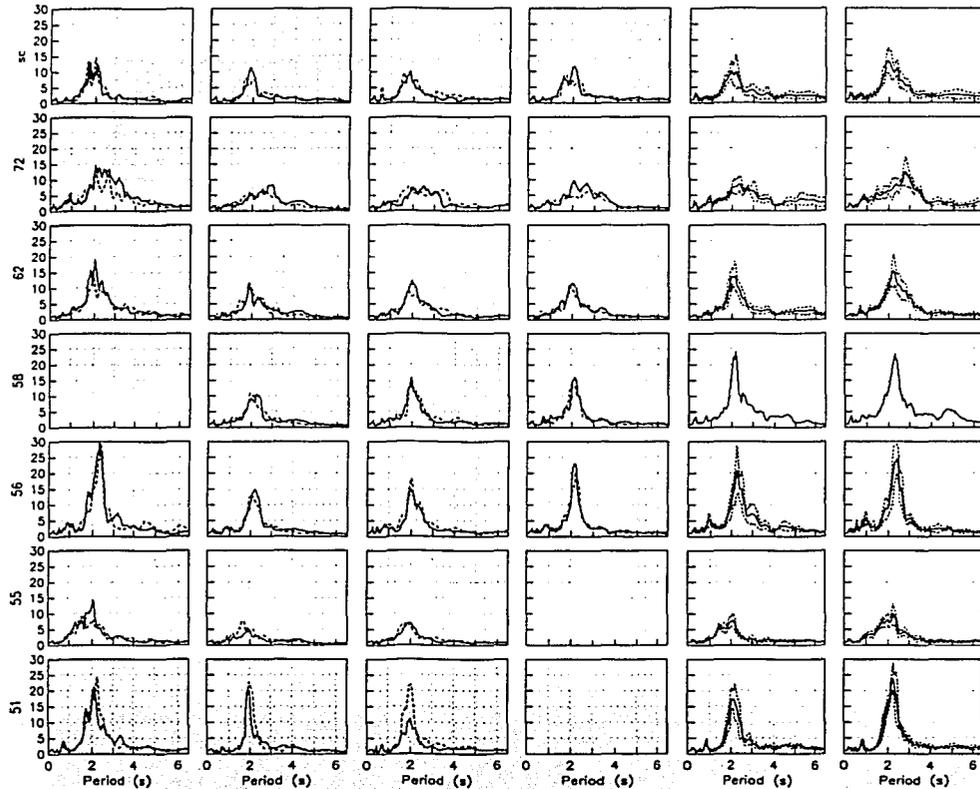


Figura 3.7 Cocientes espectrales para estaciones con $1.8 < T_s < 2.5$ segundos a partir de EAF

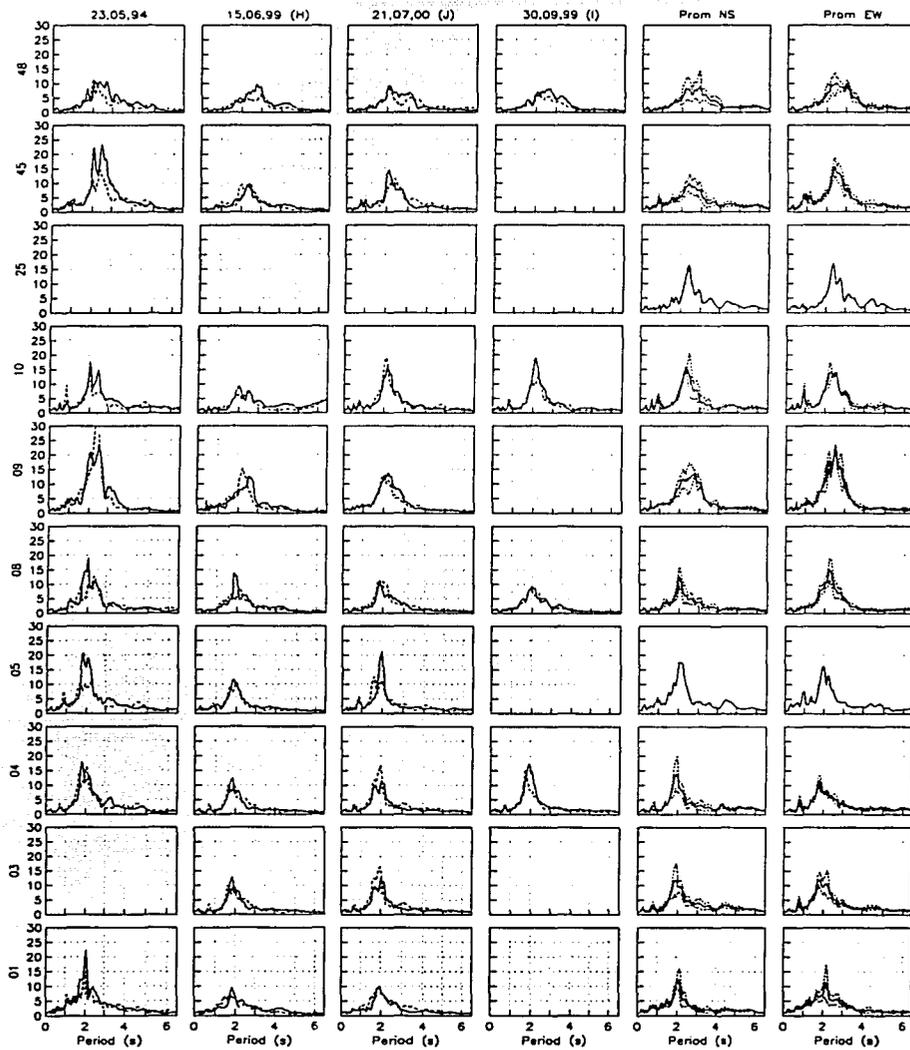


Figura 3.7 (Continuación)

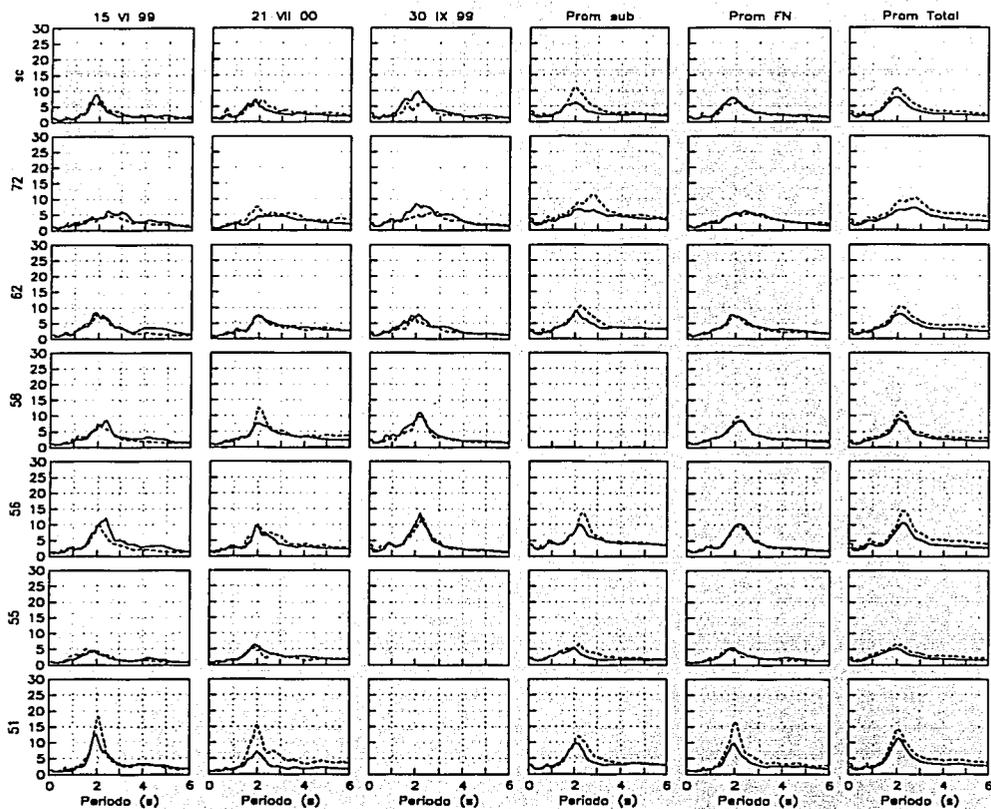


Figura 3.8 Cocientes espectrales para estaciones con $1.8 < T_s < 2.5$ segundos a partir de ER

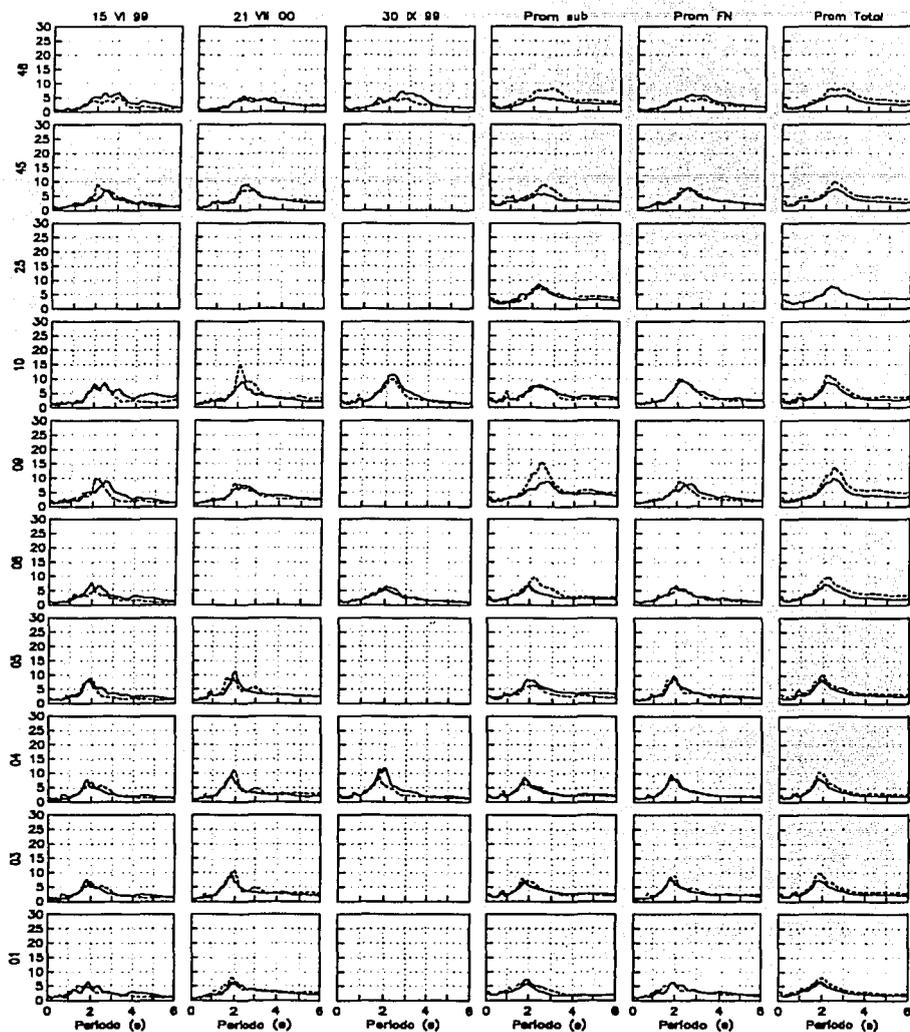


Figura 3.8 (Continuación)

Sitios con T_s alrededor de 3.0 segundos

Estos sitios pueden alcanzar amplificaciones en el periodo dominante casi tan grandes como 50 (figura 3.9 y 3.10). Las diferencias entre las componentes son mayores y la desviación estándar es también grande. Algunos de estos sitios están localizados donde ha sido observado un gran daño durante el sismo de 1985 (Evento 12), como es en la estación 49 en el Centro Médico con $T_s=2.8$ s, donde algunos edificios colapsaron y otros fueron dañados. Situado en el corazón del Lago de Xochimilco, el sitio 36 con $T_s=3.5$ s muestra formas regulares pero con muy grandes amplitudes medias (40-50). Se puede apreciar que para los sitios 36 y 80 con $T_s=2.8$ s en ambas estaciones ubicadas al sur de la ciudad de México crece la amplificación conforme aumenta el periodo del suelo de 2.8 a 3.5 s. Además, los sitios 49 y 80 con igual T_s tienen un promedio de amplificación diferente que pasa de 40 a 20 veces la amplificación respectivamente, es decir, que la amplificación en promedio es mayor para sitios del norte con respecto al sur. Algunos otros sitios como 43 y 59 con $T_s=3.1$ s, CD con $T_s=3.2$ s y 68 con $T_s=3.3$ s tienen comportamiento no lineal con amplitudes medias (15-20). Para las estaciones 06 con $T_s=2.8$ s y 59 se observa el componente NS un poco más grande del evento sísmico de falla normal 23/05/94 (Evento 45).

En la figura 3.10 producto de cocientes espectrales de respuesta se presentan las mismas observaciones que en la figura 3.9.

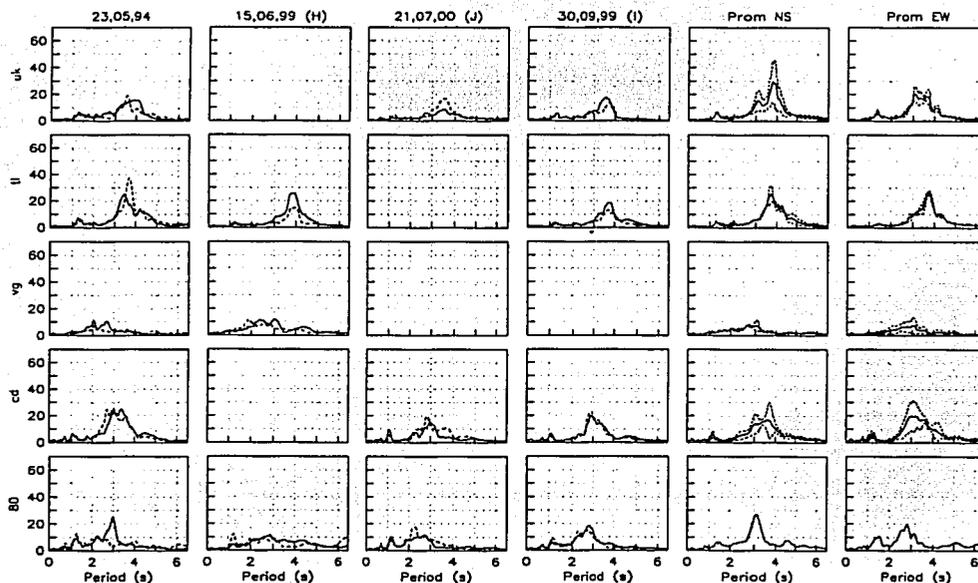


Figura 3.9 Cocientes espectrales para estaciones con T_s alrededor de 3.0 segundos a partir de EAF

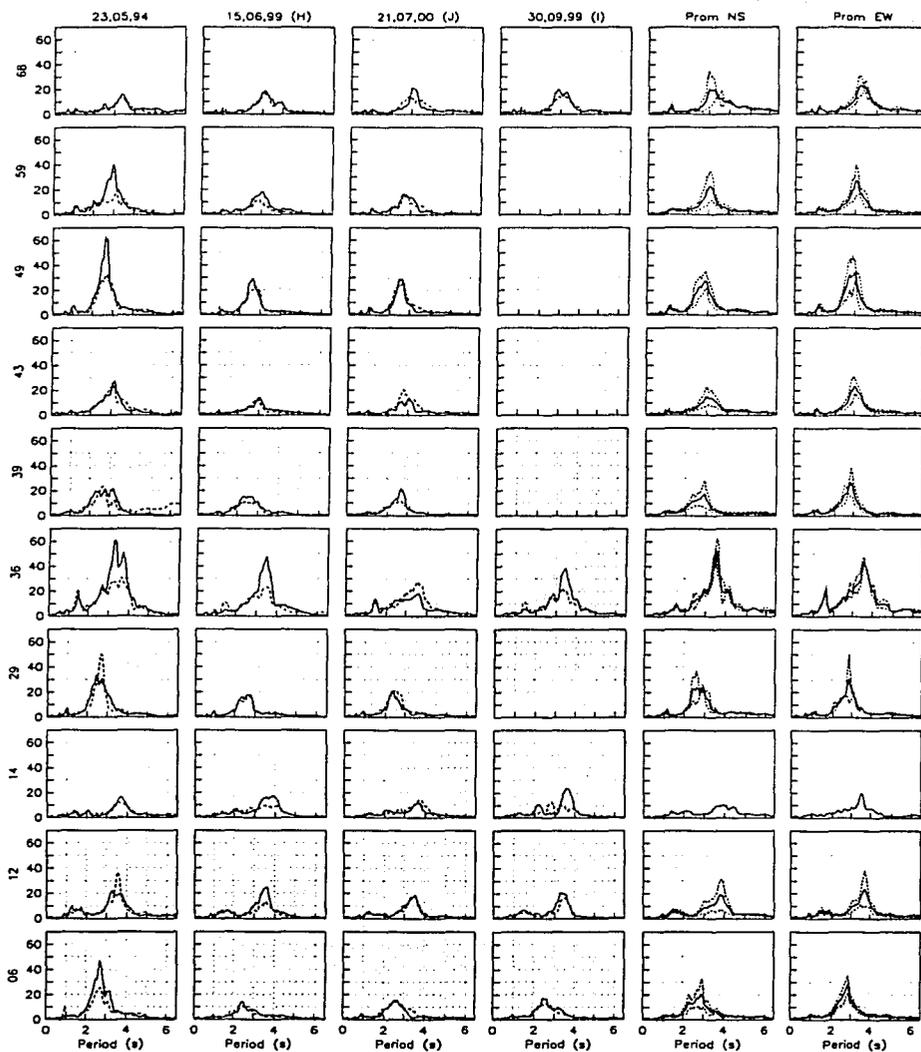


Figura 3.9 (Continuación)

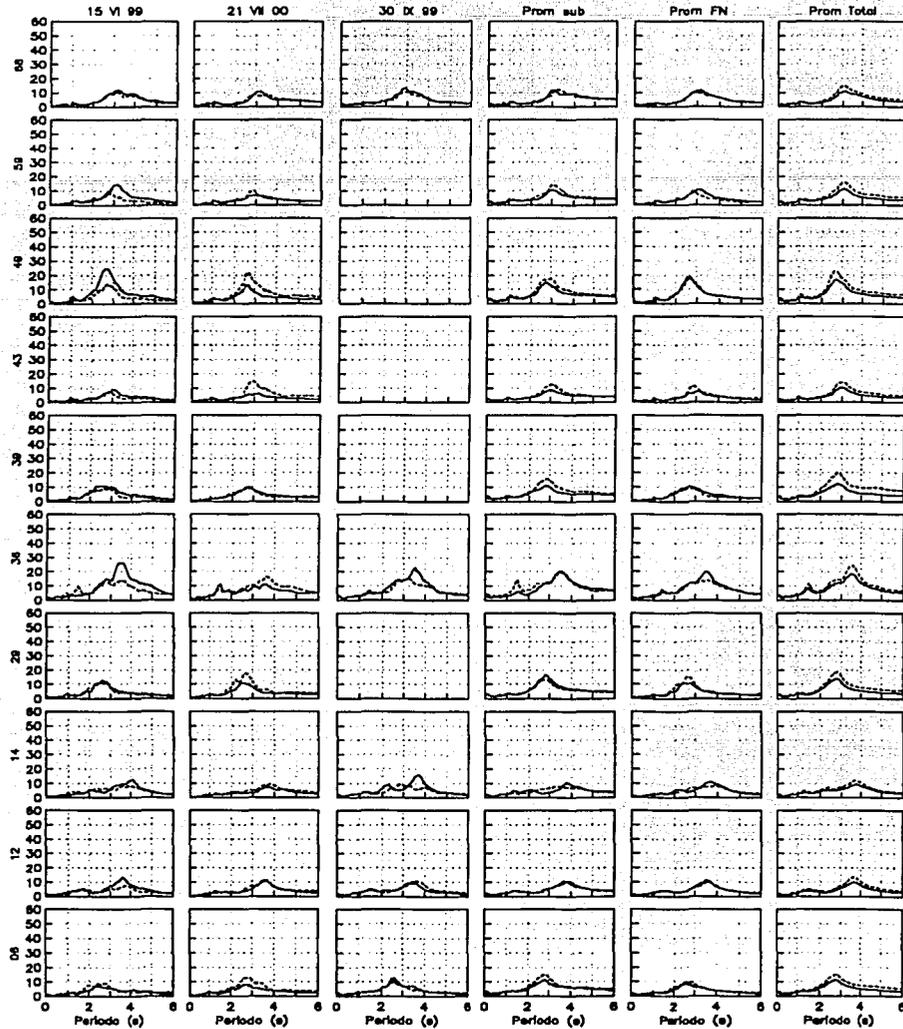


Figura 3.10 Cocientes espectrales para estaciones con T_s alrededor de 3.0 segundos a partir de ER

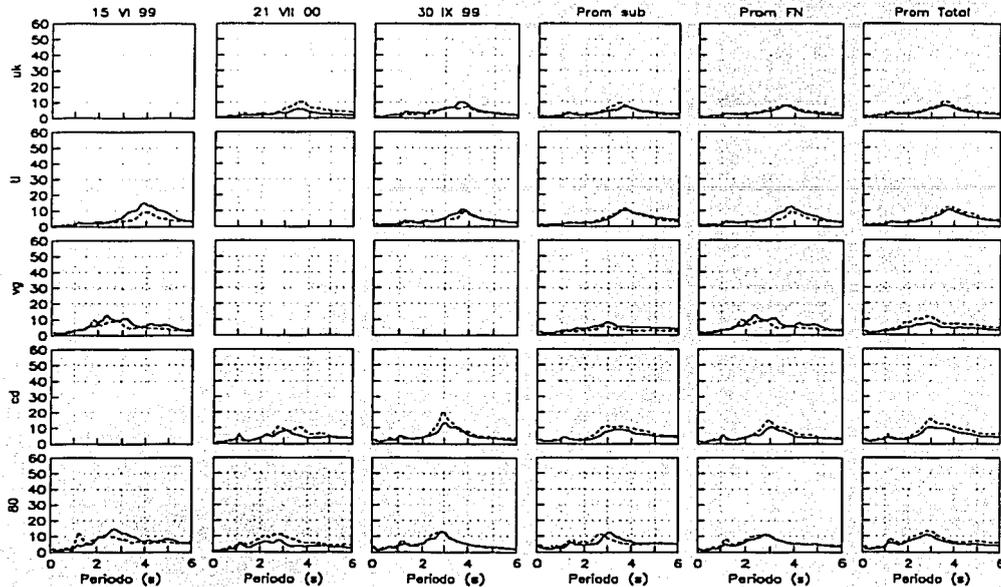


Figura 3.10 (Continuación)

Sitios con $T_s > 3.8$ segundos

En los sitios sobre depósitos de arcilla en el norte de la zona del lago de la ciudad de México se tienen periodos dominantes entre 3.8 y 5.2 segundos, y amplitudes de hasta 75 veces el movimiento observado en zona de lomas (Figura 3.11 y 3.12). En general la desviación estándar es grande y el comportamiento de ambos componentes horizontales para algunas estaciones pueden diferir sustancialmente, rigiendo principalmente el componente NS.

En la figura 3.11 se puede observar que los sitios 31 con $T_s = 5.2$ s y 02 con $T_s = 5.1$ s presentan los T_s más altos en el valle de México. Son en estas estaciones en donde se presentan las mayores amplificaciones de la ciudad de México. Además en estos 2 sitios la amplificación es mucho mayor en el componente NS que en el EW para todo tipo de eventos (subducción y falla normal), alcanzando una amplificación del orden de 80 veces la de terreno firme. Sin embargo, no se encuentra un patrón de amplificación debido a la fuente sísmica o al azimut.

Aunque los cocientes muestran amplitudes grandes y la mayor parte de esta zona está altamente urbanizada, no se han observado daños aquí durante sismos debido a que pocas estructuras pueden vibrar con el periodo largo dominante de estos sitios. En la figura 3.12 se presentan los cocientes espectrales generados a partir de espectros de respuestas los cuales presentan un comportamiento similar a los de la figura 3.11

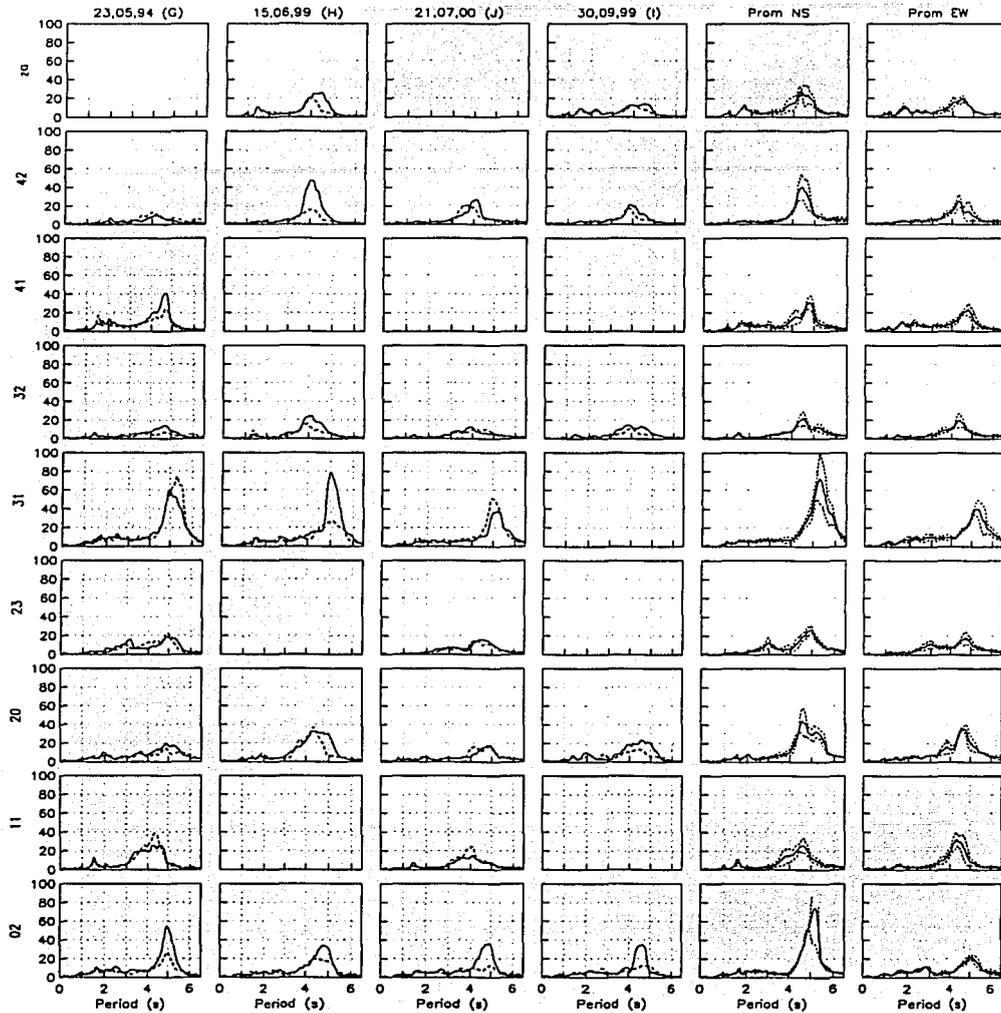


Figura 3.11 Cocientes espectrales para estaciones con $T_s > 3.8$ segundos a partir de EAF

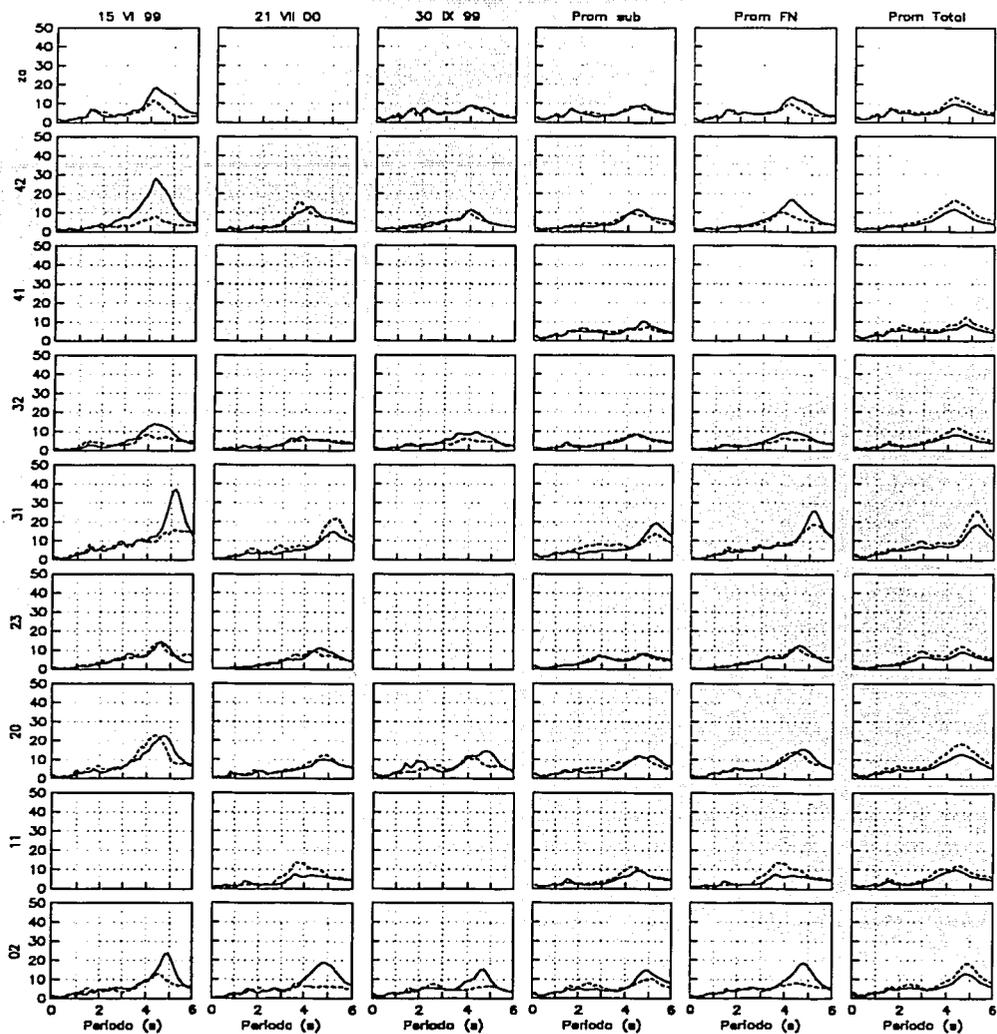


Figura 3.12 Cocientes espectrales para estaciones con $T_s > 3.8$ segundos a partir de ER

Sitios en el centro del lago de Tláhuac

Las estaciones 35 y TB con periodo de suelo $T_s=5.0$ s (Tabla 2.1) en el sur del lago Xochimilco-Tláhuac se comportan muy diferentes a otros sitios con periodo similar (sitio 20 y 23 con $T_s=4.9$ s). En estos sitios los depósitos de arcilla tienen más de 130 metros de profundidad, y estos tienen complejos patrones de amplificación que gobiernan el movimiento. Esto se aprecia en las figuras 3.13 y 3.14 donde los cocientes espectrales para el sitio 35 muestran diferentes formas para cada evento (y mayor desviación estándar) para ambos componentes; el periodo dominante del sitio debe ser alrededor de 5 segundos pero las relaciones muestran varios picos, diferentes para ambos componentes. Ordaz y Faccioli también han estudiado la estación TB encontrando que exhibe comportamiento no lineal. Además un modelo bidimensional propuesto para comparar la relación observada en el sitio TB contra la función de transferencia unidimensional (Reinoso *et al.* 1997) dio como resultado que el primero es mejor que el segundo y que la orilla y forma del valle de México podría estar afectando los modelos de amplificación.

En la figura 3.14 se presentan los cocientes generados a partir de espectros de respuestas. En esta se observan algunas diferencias en el resultado del promedio del cociente total con respecto a los presentados en la figura 3.13.

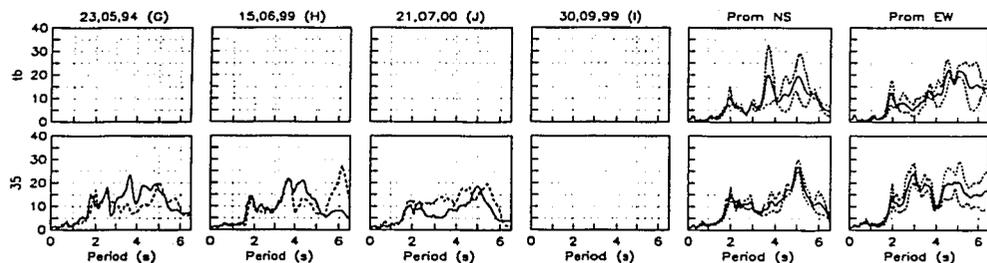


Figura 3.13 Cocientes espectrales para estaciones en el centro del lago de Tláhuac a partir de EAF

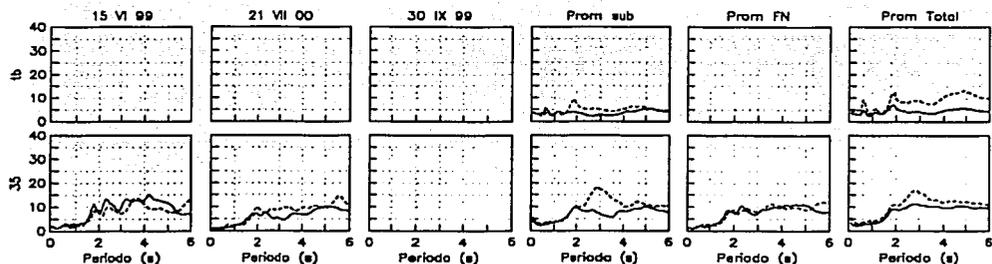


Figura 3.14 Cocientes espectrales para estaciones en el centro del lago de Tláhuac a partir de ER

Sitios cercanos a las orillas de la zona del lago

Aunque la zona del lago de la Ciudad de México tenga bordes muy suaves y la teoría unidimensional trabaja bien, hay algunos sitios, aparte del 35 y TB antes mencionados, donde los cocientes sugieren un comportamiento de amplificación tridimensional. Los cocientes calculados para el sitio 17 (figura 2.1) no tienen un claro periodo dominante sino un conjunto de picos de 1 a 3.2 segundos. Lo notable es que se observa el mismo comportamiento para ambos componentes horizontales y durante todos los eventos sísmicos. La desviación estándar es pequeña, pero los patrones de amplificación que gobiernan la respuesta del sitio 17 son muy diferentes de aquellos predichos por la teoría unidimensional. Los sitios 33 y TD (figura 3.15 y 3.16), cerca del borde del sur del lago, parecen estar influenciados por el azimut del sismo, un factor que tiene que ser confirmado por datos futuros y modelos analíticos. En la figura 3.16 que corresponden a los cocientes de ER se presentan algunas diferencias con las observadas en la figura 3.15 como es la amplificación.

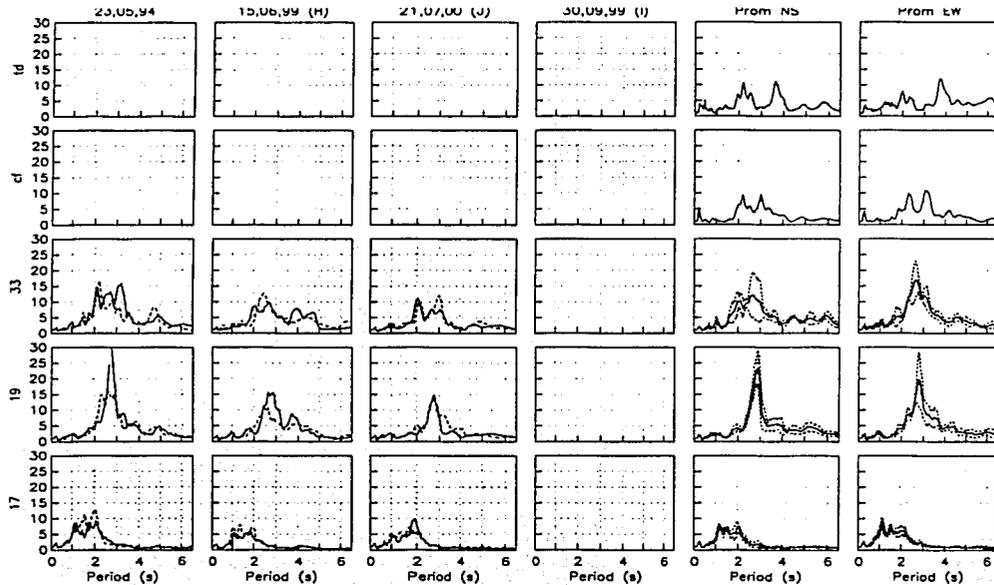


Figura 3.15 Cocientes espectrales para estaciones en las orillas de la zona del lago a partir de EAF

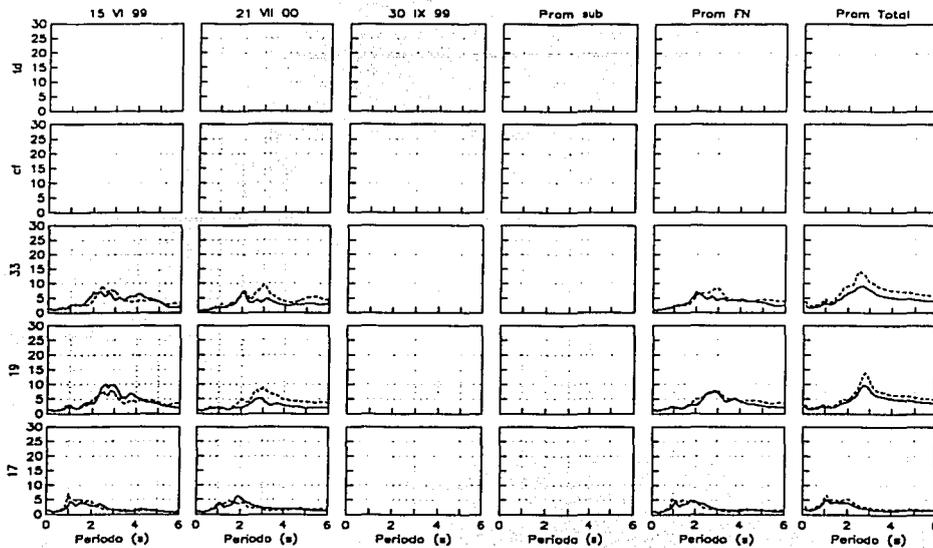


Figura 3.16 Cocientes espectrales para estaciones en las orillas de la zona del lago a partir de ER

3.2 Cálculo de cocientes de respuesta con respecto a CU

Se determinaron los cocientes espectrales de respuesta promedio entre la estación CU y las estaciones 54, 49, CD y SCT tomando los eventos de la Tabla 2.1 marcados con la observación 4 a 6 respectivamente, obtenidos a partir de la siguiente expresión:

$$CER_{ij} = \frac{\sum_{j=1}^N ER_{ij}}{N ER_{CUj}} \quad (3.3)$$

ER_{ij} es el espectro de respuesta en la estación i debido al evento j

ER_{CUj} es el espectro de respuesta en la estación CU debido al evento j

N es el número de eventos

Se realiza una comparación entre el promedio de estaciones en zona de lomas (SE) calculado con la expresión (3.1) y considerando solamente la estación CU como referencia para calcular los cocientes espectrales de respuesta (CER) con el objetivo de observar si existe alguna diferencia entre tomar una u otra.

En la figura 3.17 se puede observar el cociente de respuesta de la estación 54 debido a cada uno de los eventos de la Tabla 2.1 marcados con el número 4, así como, con una línea más gruesa, el promedio obtenido como lo indica la expresión 3.3. En este sitio se observa que en el periodo dominante del

suelo la amplitud varía desde 5 hasta 20 veces con respecto a CU. En cambio, al observar la figura 3.6 se observa una amplitud máxima de 10 que se mantiene estable para todos los eventos utilizados. Ahora, analizando los datos de esta figura se observó que los sismos de falla normal son los que provocan mayor amplitud comparándolos con los de subducción. Se realizó una regresión lineal de amplitud contra distancia para un periodo de ± 1.1 s y se encontró que existe muy poca correlación (figuras 3.18a y 3.18b) para ambos componentes.

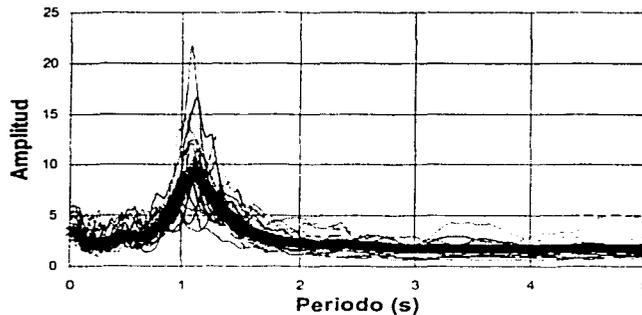
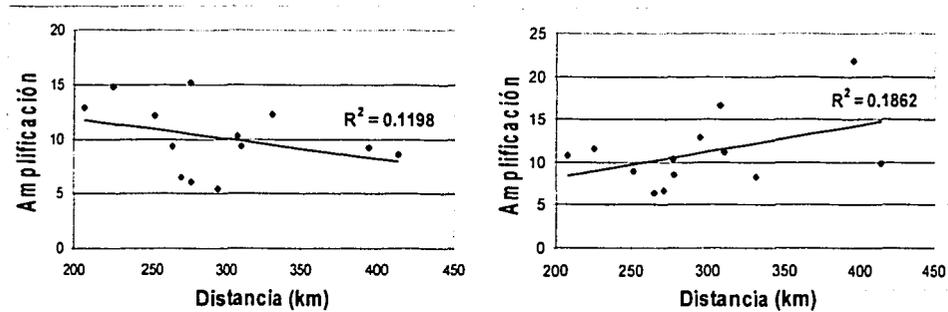


Figura 3.17 Cocientes espectrales 54/CU



a) Componente EW

b) Componente NS

Figura 3.18 Amplificación vs distancia para la estación 54

En la figura 3.19 se muestran los cocientes espectrales realizados entre las estaciones CD y CU, en ambos direcciones, así como el promedio de los cocientes espectrales con una línea más gruesa. En esta figura se puede observar que los cocientes de respuesta obtenidos para los eventos de la Tabla 2.2 que tienen como observación el número 7 presentan variaciones muy grandes entre ellos y aunque se observó que las ampliaciones fueron mayores para los sismos de falla normal que los de subducción, no se pudo concluir nada contundente. Lo que si se puede decir es que existe una gran semejanza entre

las amplitudes del cociente calculadas a partir espectros de respuesta considerando solamente el espectro de respuesta del sitio CU, y que tomando el promedio de los espectros de respuesta de lomas como se puede observar en la figura 3.10 en las dos últimas columnas de la estación CD.

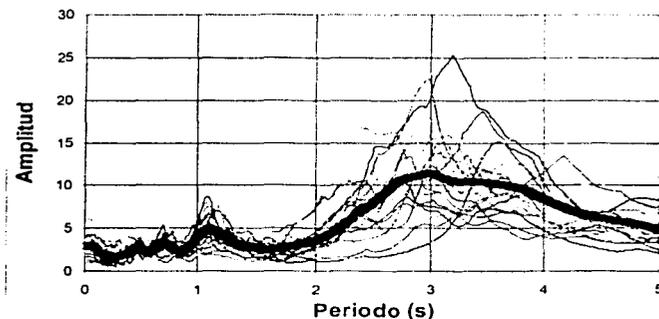


Figura 3.19 Cocientes espectrales CD/CU

En la figura 3.20 se muestran los cocientes 49/CU de respuesta de los eventos de la Tabla 2.1 que tienen como observación el número 5, así como el promedio con línea más gruesa obtenido de la ecuación (3.3). En esta figura se puede observar que la amplitud máxima es menor que considerando el espectro promedio en zona de lomas. También se puede decir que a partir de este análisis no se observa que exista un patrón a cual atribuir esta enorme variación de 10 a 40 en la amplificación en el periodo del suelo ($T_s=2.8$ s).

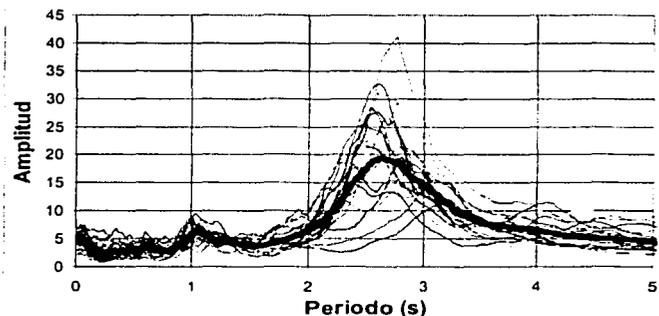


Figura 3.20 Cocientes espectrales 49/CU

En la figura 3.21 se observan los cocientes SCT/CU de respuesta, así como con una línea más gruesa el promedio de los cocientes de respuesta obtenidos a partir de los eventos de la Tabla 2.1. En esta figura se puede observar que la amplitud máxima es ligeramente menor a la obtenida considerando el promedio de los espectros de respuesta en lomas (figura 3.8). En esta figura se observa una gran variación en los periodos dominantes en donde se presenta la amplificación máxima.

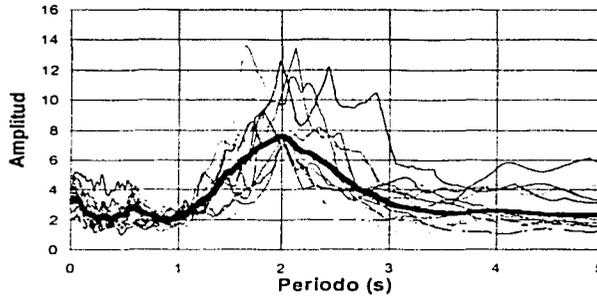


Figura 3.21 Cocientes espectrales SCT/CU

En la figura 3.22 se presenta los cocientes de respuesta de las estaciones 49, 54, CD y SCT. En las dos primeras columnas se presenta el cociente de respuesta para las componentes EW y NS obtenidas a partir de la expresión 3.3 así como la desviación estándar obtenida en cada una de ellas. En la tercera y cuarta columna se presenta el cociente de respuesta para las componentes EW y NS considerando el promedio de los espectros de respuesta en lomas así como la desviación estándar. En la penúltima columna se presenta el promedio (expresión 3.1 y 3.2) considerando solamente el sitio CU como referencia para el cálculo del cociente espectral. Y en la última columna se presenta el promedio calculado (expresión 3.1 y 3.2) pero considerando el promedio de lomas. De esta figura se concluye que se puede considerar más adecuado el considerar un promedio en zona de lomas con una desviación estándar. Además con la ventaja de poder considerar un menor número de registros para el cálculo de cocientes espectrales de respuesta, tal y como lo propone Arciniega *et al.* (1993).

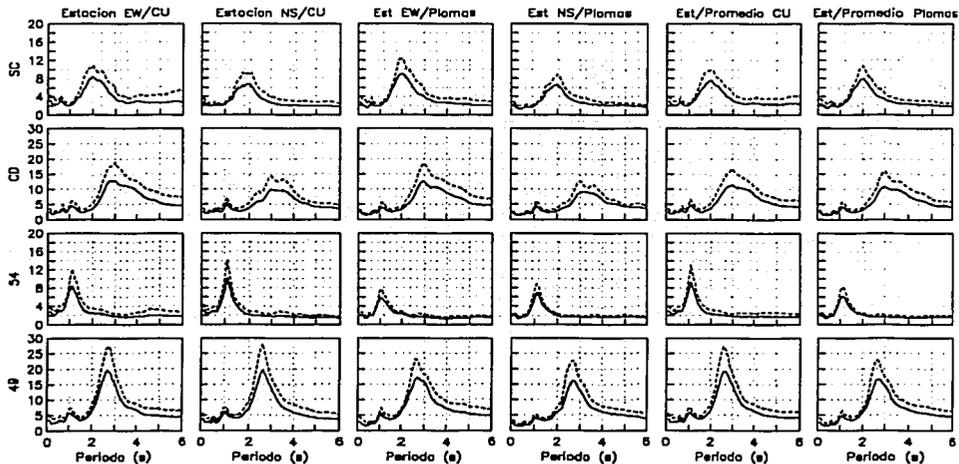


Figura 3.22 Cocientes de respuesta para las estaciones 49, 54, CD y SCT

3.3 Mapas de igual amplificación para sismos de subducción y falla normal

Para una mejor apreciación de los efectos de amplificación en el valle de México y con ayuda de los cocientes espectrales obtenidos a partir de EAF mostrados anteriormente para los eventos sísmicos del 21 de julio de 2000 (Evento 80), del 15 de junio de 1999 (Evento 77) y del 23 de mayo de 1994 (Evento 45) se presentan las figuras 3.23 a 3.25 respectivamente. Además de la figura 3.26 obtenida a partir de los promedios de los cocientes de todos los sismos de subducción de la tabla 3.1. Finalmente, con los cocientes espectrales promedio más una desviación estándar conseguidos a partir de la relación entre los espectros de respuestas promedios en zona de lomas y el espectro en estaciones en zona de transición y lago de México se elaboró la figura 3.27. En estas figuras se observa una gran similitud en la forma en que se presenta la amplificación en el valle de México a pesar de que son de distintos orígenes (falla normal y subducción). Estas figuras muestran también las zonas donde se han reportado daños durante el sismo de 1985.

En todas estas figuras se muestran las curvas de igual amplificación para varios intervalos de periodos estructurales. En cada una de ellas se muestran cuatro gráficas que corresponden a periodos estructurales de 1.5, 2, 3 y 5 segundos, calculadas tomando el mayor valor correspondiente a un intervalo de ± 0.25 segundos en cada periodo. Las 3 primeras curvas ($T=1.5$, 2 y 3 segundos) corresponden a 4 niveles de amplificación, del tono más claro al más oscuro, de 0.0 a 5, de 5 a 10, de 10 a 15 y mayor que 15 con respecto a zona de lomas, respectivamente. Para la cuarta curva ($T=5$ segundos) hay 4 niveles de amplificación, nuevamente del tono más claro al más oscuro, de 0.0 a 5, de 5 a 20, de 20 a 40, de 40 a 70 y mayor que 70 con relación a zona de lomas del valle de México. Estos niveles de amplificación son sólo para observar la variación de la amplificación y su distribución en el valle de México. También se muestran con líneas oscuras las zonas de daño del sismo de 19 de septiembre de 1985 donde las zonas con bordes rectos representan los límites de las zonas que presentaron daños (curvas exterior) y las otras zonas representan las zonas de mayor daño incluso el colapso de estructuras (curvas interior).

Algunas de las gráficas más interesantes de las figuras 3.23 a la 3.27 son las correspondientes a los periodos de 1.5 y 2 segundos ya que son las que mejor se correlacionan con las zonas de daño de sismos pasados.

La gráfica correspondiente al periodo de 5 segundos donde se encuentra el aeropuerto y el lago de Texcoco es donde se presentan las mayores amplificaciones en todo el valle de México (Figura 3.24 a 3.26).

También en las figuras 3.23 a 3.27 se observa que al sur del valle de México (Xochimilco y Tláhuac) existen zonas con gran amplificación, aunque en estas zonas existe menor número de estaciones por los contornos de amplificación tienen una gran incertidumbre al igual que en la zona noreste del valle.

Con este tipo de mapas se podrían identificar zonas de peligro en zona de lago para construcciones nuevas como es el caso del sur de Xochimilco y Tláhuac. En estas zonas aún no hay estructuras de más de 5 niveles pero se deben tomar medidas necesarias para evitar daños a este tipo de estructuras durante sismos futuros. Conforme se incrementa el periodo estructural la amplificación se mueve hacia las zonas de estratos de arcilla más profundos con T_s mayores ya que la amplificación máxima corresponde como se había mencionado antes al periodo más largo (dominante) del terreno. En estas zonas de gran amplificación no se han registrado daños durante sismos pasados, esto se debe a que no existían estructuras con periodos tan largos.

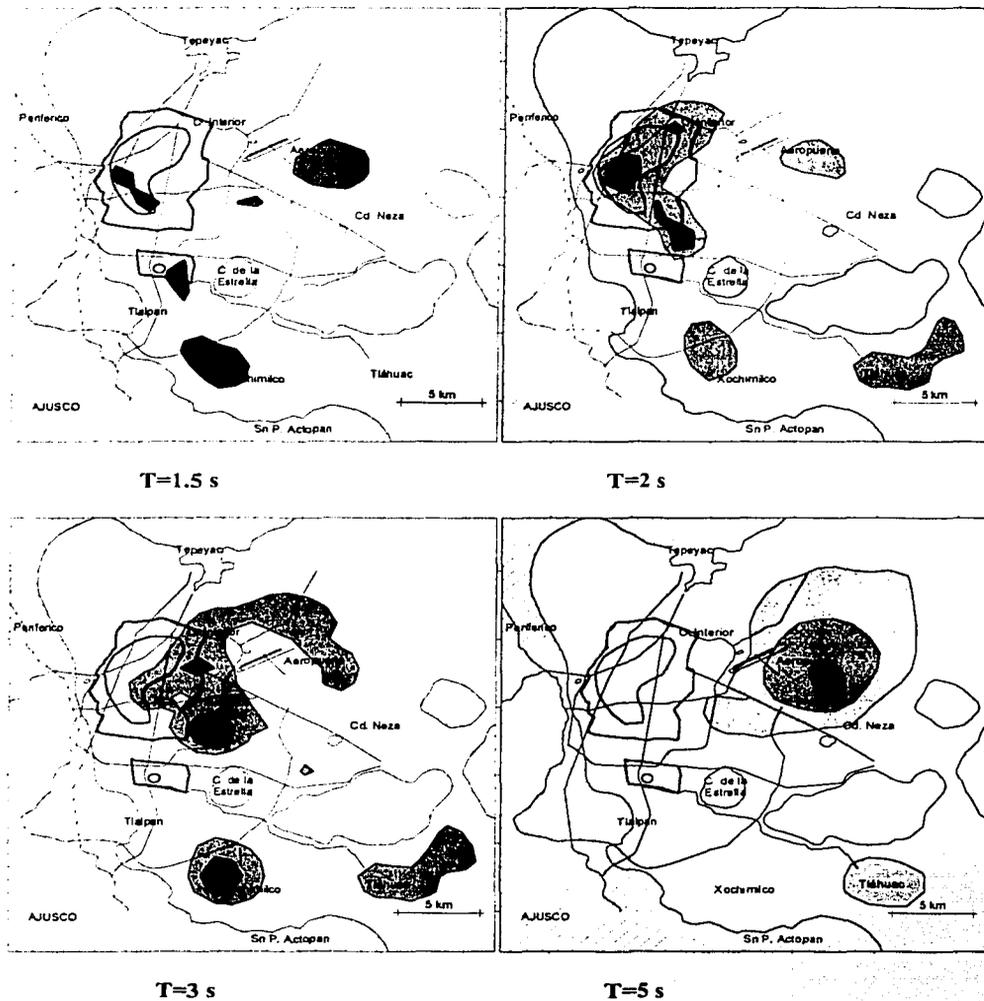


Figura 3.23 Mapas de igual amplificación para diferentes periodos dominantes del suelo obtenido para el sismo del 21 de julio de 2000 (Falla normal)

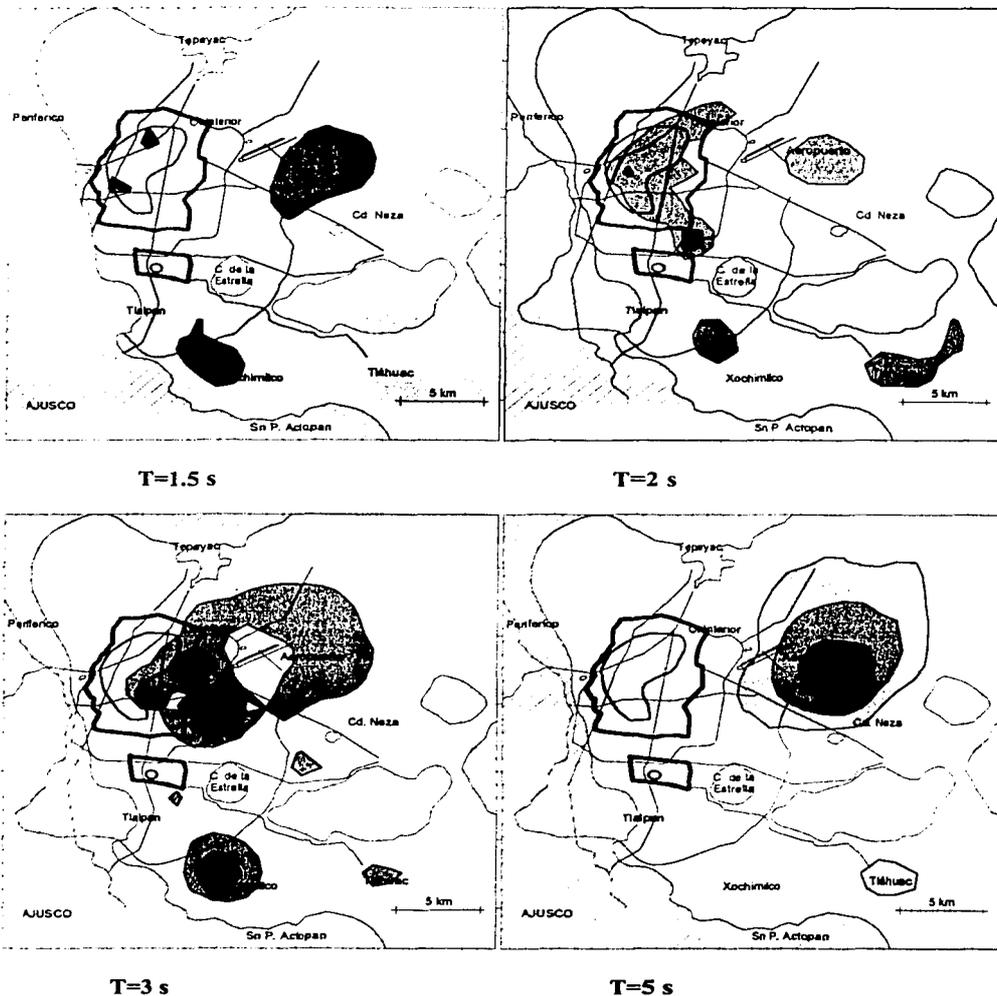


Figura 3.24 Mapas de igual amplificación para diferentes periodos dominantes del suelo obtenido para el sismo del 15 de junio de 1999 (Falla normal)

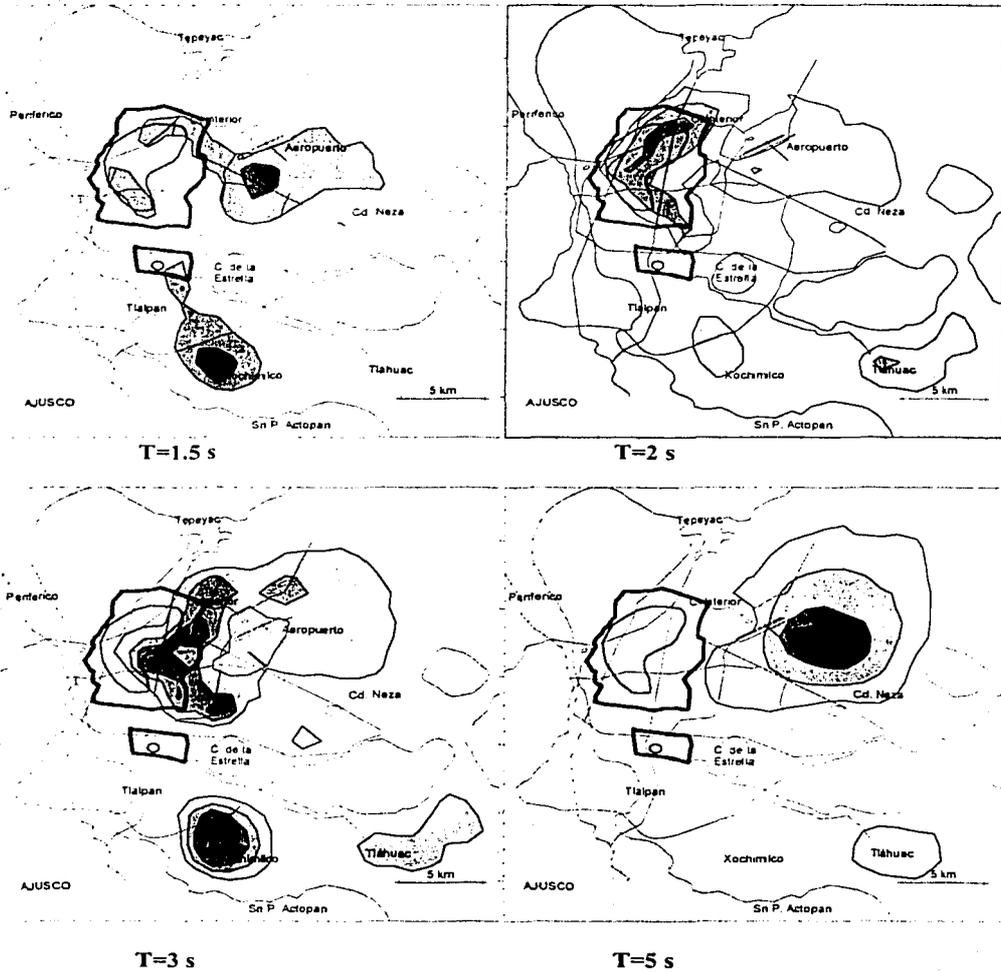


Figura 3.25 Mapas de igual amplificación para diferentes periodos dominantes del suelo obtenido para el sismo del 23 de mayo de 1994 (Falla normal)

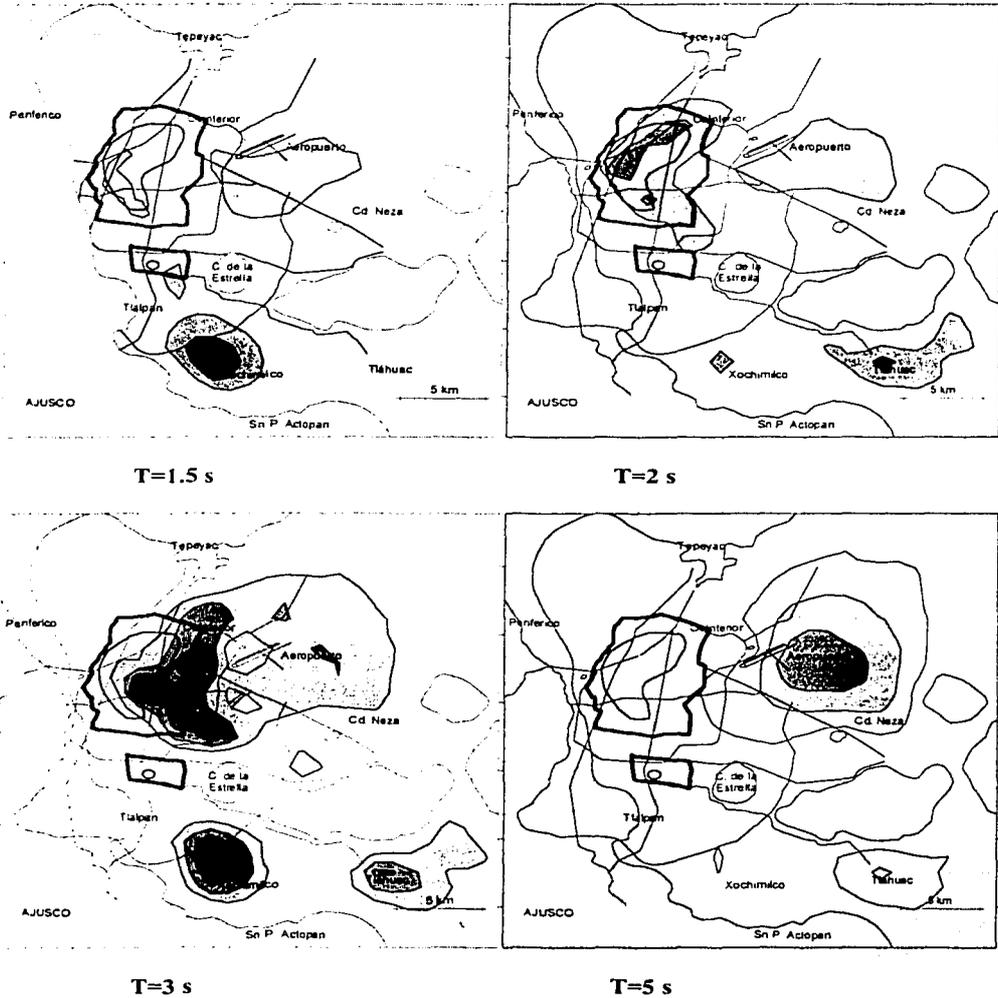


Figura 3.26 Mapas de igual amplificación para diferentes periodos dominantes del suelo obtenido para el promedio de los sismos de subducción

La conclusión que se puede mencionar es que los cocientes generados a partir de espectros de respuesta (CER) más una desviación estándar obtenidos a partir del promedio de espectros en zona de lomas considerando la zona sur-oeste (estaciones 13, 34, 40, 50, 74, 78, CU, CH y TY, Tabla 3.2) dan una buena aproximación de la amplificación esperada en cada sitio del valle de México.

De las figuras 3.23 a 3.27 para los distintos periodos se observa que las zonas en que se presenta la amplificación máxima son recurrentes, con poca variación de un sismo a otro que puede ser atribuida a la magnitud, distancia epicentral y en menor escala a las características del sismo. De comprobarse este patrón para sismos futuros, el promedio de estas curvas puede contarse como una herramienta más para la microzonificación de la ciudad, proponiendo en las zonas de mayor amplificación recomendaciones.

Capítulo 4

Escenarios de riesgo sísmico en la ciudad de México debido a sismos de falla normal y subducción

En esta parte se estiman movimientos futuros del terreno en el valle de México que resultarían de la ocurrencia de sismos de falla normal y de subducción hipotéticos de diferentes magnitudes asociado a un periodo de recurrencia de 125 años, a partir de acelerogramas registrados en la ciudad de México. El método de simulación que se emplea es el propuesto por Ordaz *et al.* (1995), el cual utiliza registros de aceleración como funciones de Green empíricas. Con los resultados que se obtienen de la ayuda de esta técnica se pueden vislumbrar algunos ejemplos de cuáles fueron y podrían ser los escenarios de peligro en el valle de México, así como la forma en que afectarían a los espectros de diseño que están marcados en las nuevas normas técnicas complementarias de sismos (NTCS-2002).

4.1 Método de simulación propuesto por Ordaz *et al.* (1995)

El método de simulación de sismos que utilizan registros de eventos pequeños como funciones de Green empíricas (FGE) consiste en suponer que un acelerograma $a_s(t)$ es el registro generado por un temblor de pequeña magnitud y que está muy probablemente asociado a una fuente sísmica simple, por lo que las complejidades observadas en el acelerograma son atribuibles principalmente a las modificaciones que sufren las ondas por efectos de trayecto y de sitio. De tal manera que el registro del temblor pequeño puede considerarse como la función de Green del medio, es decir la aceleración que se produce en el sitio de registro cuando en la fuente se aplica una dislocación puntual. Para simular un acelerograma producto de un temblor de diferente magnitud bastará con conocer la historia de las dislocaciones elementales en la fuente correspondiente y efectuar la convolución de esta función de fuente con la función de Green. En esta parte del trabajo se emplea una técnica de simulación (Ordaz *et al.* 1995) que retoma ciertos principios propuestos por Joyner y Boore (1988), superando algunas limitaciones, ya que se generan acelerogramas sintéticos con un contenido de frecuencias caracterizado por el modelo de fuente de Brune (1970) los cuales presentan además una evolución realista del contenido espectral sin tener que utilizar funciones de modulación especiales.

En síntesis el procedimiento utilizado para simular los acelerogramas consiste en superponer la siguiente ecuación (Ordaz *et al.*, 1995):

$$N = \left(\frac{M_{oe}}{M_{os}} \right)^{4/3} \left(\frac{\Delta\sigma_e}{\Delta\sigma_s} \right)^{-4/3} \quad (4.1)$$

N número de veces la función de Green empírica escalada por un factor ζ dado por:

$$\zeta = \left(\frac{M_{oe}}{M_{os}} \right)^{-1/3} \left(\frac{\Delta\sigma_e}{\Delta\sigma_s} \right)^{4/3} \quad (4.2)$$

Defasándola cada vez un tiempo t_i , $i = 1, \dots, N$, en que los tiempos t_i son aleatorios, independientes e igualmente distribuidos con una densidad de probabilidades dada por la ecuación (4.3 y 4.4).

$$p(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1 + \alpha(\omega \omega_{ce})^2}{1 + (\omega \omega_{ce})^2} e^{i\omega t} d\omega \quad (4.3)$$

$$\text{donde } \alpha = \frac{2\omega_{ce}^2}{\omega_{ce}^2 + \omega_{cs}^2} \quad (4.4)$$

Teniéndose que M_{oe} , $\Delta\sigma_e$ y ω_{ce} son los parámetros del sismo objetivo, mientras que M_{os} , $\Delta\sigma_s$ y ω_{cs} son los de la función de Green los cuales representan respectivamente el momento sísmico en dina-cm, la caída de esfuerzos en bars y la frecuencia de esquina angular, la cual se define mediante la ecuación (4.5) dada en el modelo propuesto por Brune (1970).

$$\omega_c = 2\pi 4.9 \times 10^6 \beta (\Delta\sigma/M_o)^{1/3} \quad (4.5)$$

En donde β es la velocidad de propagación (en km/s) de las ondas S, $\Delta\sigma$ la caída de esfuerzos (en bar) y M_o el momento sísmico (dina - cm).

La teoría que lleva a establecer toda esta serie de expresiones matemáticas se fundamenta en un proceso en cuya primera etapa se resuelve un sistema de ecuaciones con dos incógnitas (ecuaciones 4.1 y 4.2), que resulta de igualar los límites de alta y baja frecuencia, de una función analítica que se obtiene a partir del valor esperado del espectro de amplitudes de Fourier, con los límites que se obtienen a partir de un cociente espectral caracterizado de acuerdo al modelo omega cuadrada ω^2 . En la obtención del valor esperado de amplitudes de Fourier, se considera una fuente sísmica puntual dividida en N celdas elementales, cada una de las cuales se genera comenzando en un instante t_i , $i = 1, \dots, N$, una señal cuyo espectro de Fourier está escalado mediante una constante ζ (Iglesias, et al. 1998).

Posteriormente, en la segunda etapa se establece una relación adicional tomando en cuenta que si se desea diseñar un esquema de suma de funciones de Green empíricas (FGE) tal que, en promedio y para todas las frecuencias, se obtengan temblores con un contenido espectral congruente con el modelo de escalamiento ω^2 , se deben igualar las expresiones correspondientes a los cocientes entre los espectros de amplitudes para cualquier valor de ω .

4.2 Movimientos futuros calculados por medio de funciones de Green

Con la disponibilidad de registros en el valle de México y en virtud de que el método de simulación a emplear se fundamenta en la utilización de registros pequeños como funciones de Green, en este trabajo serán utilizados como funciones de Green algunos de los registros correspondientes a los sismos de la Tabla 4.1 en donde se mencionan datos básicos como son las coordenadas del epicentro del sismo, magnitud (M_s), momento sísmico (M_{os}) y caída de esfuerzos ($\Delta\sigma_s$) correspondientes a 5 eventos sísmicos uno de origen de subducción y cuatro de origen de falla normal que han sido registrados en diferentes estaciones del valle de México pero que en este estudio se consideró importante que el sismo fuera registrado por la estación acelerométrica en CU. Esto último es importante debido a que se generaron los sismos grandes hipotéticos esperados para esta estación, y después con ayuda de los cocientes espectrales de respuesta (ver capítulo 2) se calculan las

aceleraciones máximas de una oscilador de un grado de libertad en otros sitios del Valle de México por medio de la expresión (4.6).

$$Sa_i(T) = Sa_{cu}(T)F_i(T) \quad (4.6)$$

donde:

$Sa_i(T)$ son las ordenadas espectrales esperadas en el sitio

$Sa_{cu}(T)$ son las ordenadas espectrales registradas en CU

$F_i(T)$ es la función de amplificación espectral del sitio, para la determinación de ésta, ver capítulo 2.

Tabla 4.1 Datos de los sismos utilizados como funciones de Green

Evento	Sismo	M_s	Epicentro		Prof. Km	Tipo	M_{0S} (dina-cm)	$\Delta\sigma_s$ (bar)
			Lat (°N)	Long (°W)				
1	25/04/89	6.9	16.58	99.48	17	Sub	¹ 2.4×10^{26}	¹ 150
2	23/05/94	5.6	18.03	100.57	50	FN	² 2.8×10^{25}	² 160
3	15/06/99	6.5	18.18	97.51	60-80	FN	³ 2.0×10^{26}	³ 15
4	30/09/99	7.5	15.95	97.03	55	FN	⁴ 2.0×10^{27}	⁴ 216
5	21/07/00	5.9	18.09	98.97	16	FN	⁵ 6.0×10^{24}	⁵ 360

¹Ordaz (1995), ²Singh (1996), ³Yamamoto (2002), ⁴Singh (1999) y ⁵Iglesias (2002)

Los acelerogramas registrados en CU se procesan para poder ser utilizados en la simulación de acelerogramas; el proceso consiste en corrección por línea base y un filtrado que separa el ruido de la señal. En la figura 4.1 se muestran los registros corregidos y filtrados que fueron utilizados como FGE. En esta figura se muestra en cada uno de los registros, el valor máximo de la aceleración registrada en los acelerogramas. El filtrado de los registros de los 5 temblores en la componente EW se realizó mediante el filtro denominado "Pasa Banda". El intervalo de frecuencias filtradas abarca de 0.15 Hz a 0.25Hz en el límite inferior y 47 Hz a 50 Hz en el límite superior.

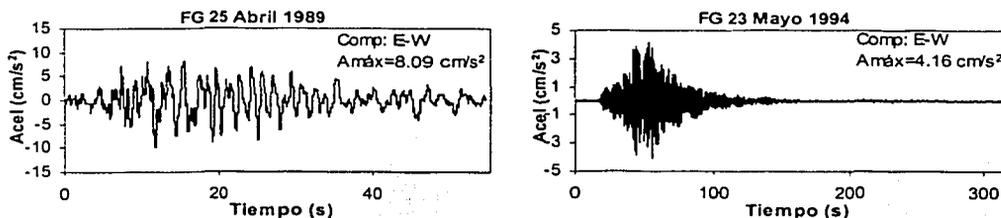


Figura 4.1 Acelerogramas corregidos y filtrados utilizados como funciones de Green

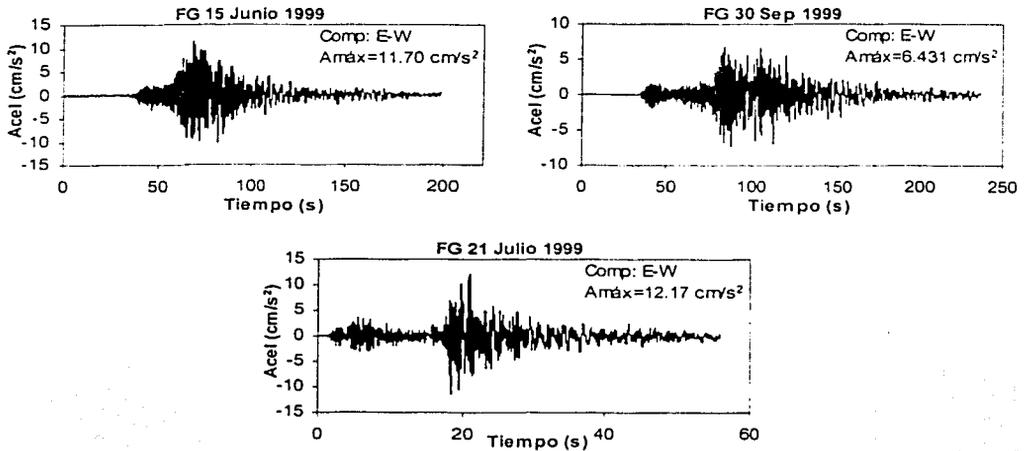


Figura 4.1 (Continuación)

4.3 Simulación de acelerogramas y espectros de respuesta para CU debidos a sismos de falla normal y subducción

Para determinar los valores de algunos de los eventos hipotéticos que razonablemente se consideran puedan llegar a ocurrir en algunas zonas del país y afecten al valle de México, se utilizó la información sísmica de las fuentes localizadas en la costa del Pacífico, así como la del interior del país realizada por diferentes investigadores en la que proporcionan información acerca de la contribución de cada fuente a la tasa de excedencia de aceleraciones en un sitio dado, $\lambda(a)$, en esta caso la estación CU. En la figura 4.2 se muestran las curvas de tasa de excedencia de aceleraciones para el sitio CU generados por cuatro fuentes sísmicas y para cinco diferentes periodos estructurales.

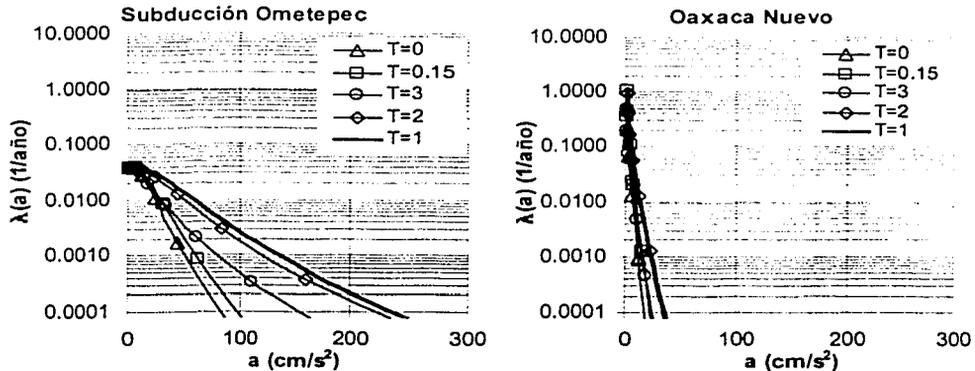


Figura 4.2 Relaciones de excedencia de aceleraciones para algunas fuentes en el país

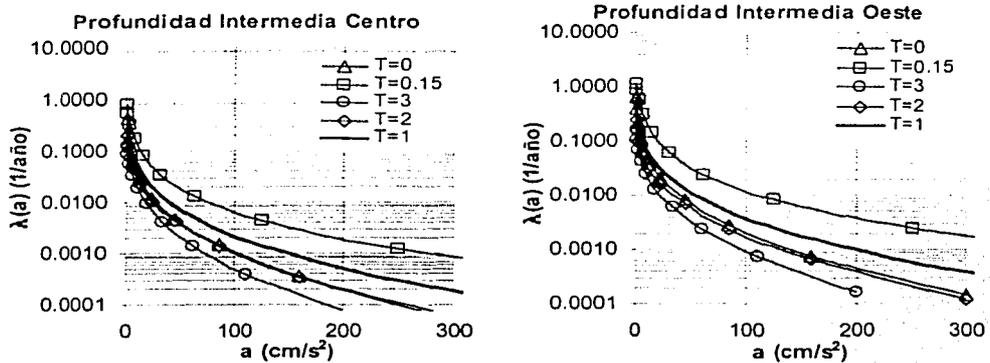


Figura 4.2 (Continuación)

Con estas relaciones de excedencia de aceleraciones se determinó la aceleración máxima del suelo ($T=0$ seg) que se presentarían en el sitio CU asociado a un periodo de retorno de 125 años. Es decir, para $\lambda(a)=0.008$ se determinaron las aceleraciones máximas del suelo asociadas para cada fuente en particular (a_{se}). Los valores obtenidos se presentan en la Tabla 4.2. En esta tabla se incluyen datos que son importantes para los sismos grandes hipotéticos esperados cuyas aceleraciones máximas de suelo en CU se asocian puedan ocurrir con un periodo de retorno de $T_R=125$ años. La tabla está organizada de la siguiente forma en las primeras 4 columnas se presentan el evento, el sismo utilizado como FGE, la fuente sísmica de donde proviene dicho sismo y el valor de la aceleración máxima del suelo en CU asociada a un $T_R=125$ años ($a_{s\text{máx}}$). En la columna 5 se presenta la aceleración del suelo máxima del suelo en CU encontrada de los acelerogramas simulados a_{se} . En la columna 6 se presenta el valor esperado de la magnitud máxima de la fuente (M_u). En la columna 8 a 11 se presenta la magnitud esperada (M_e), el momento sísmico (M_{oc}) y la caída de esfuerzos ($\Delta\sigma_e$) del evento grande hipotético para generar un sismo cuya aceleración máxima del suelo en CU este asociada un $T_R=125$ años. Estos valores a continuación se explican como se obtuvieron.

Con la aceleración máxima en CU correspondiente a un periodo de retorno de 125 años ($a_{s\text{máx}}$), a una fuente sísmica y con ayuda del método de simulación propuesto por Ordaz *et al.* (1995) antes descrito. Se generaron mediante un proceso iterativo haciendo variar el momento sísmico y la caída de esfuerzos acelerogramas sintéticos para la estación CU debido a cuatro sismos de falla normal y uno de subducción cuya aceleración máxima correspondiera a la obtenida anteriormente. La aceleración máxima del suelo encontrada de los acelerogramas simulados (a_{se}) se muestra en la columna 5 de la tabla 4.2. Se usaron como función de Green los registros obtenidos para la estación CU en la componente EW durante los temblores que se encuentran en la Tabla 4.1. En este caso la caída de esfuerzos del temblor hipotético es desconocida y debe asignarse; por lo que se eligieron dos valores para cada uno de ellos que fueran proporcionales al ocurrido por el sismo utilizado como FGE. Estos se muestran en la columna 9 de la Tabla 4.2. Y para cada uno de estos eventos se procedió a realizar la simulación.

Para los cinco sismos hipotéticos la magnitud del evento se obtuvo de la ecuación (4.7) dada por Hanks y Kanamori (1979) en la que establecen una relación entre la magnitud y momento sísmico. Los valores de la magnitud esperada (M_e) para generar la $a_{s\text{máx}}$ con $T_R=125$ años se pueden ver en la columna 7 de la Tabla 4.2.

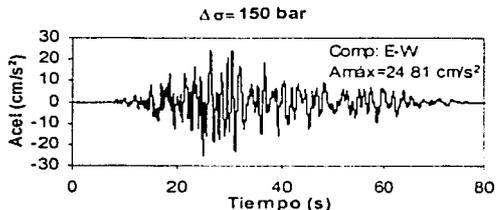
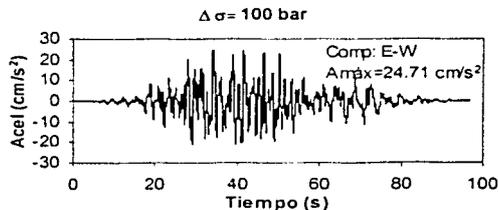
$$\log M_{oe} = 1.5M_e + 16 \quad (4.7)$$

El valor de M_e encontrado es congruente en todas las zonas excepto para el sismo en el que se utilizó como FGE el evento 2 de la Tabla 4.1 (23-05-94) que presenta una $M_e > 7.9$. Es decir, que para generar un sismo que presente la $a_{s\text{máx}}$ deseada para un $T_R=125$ años se tendría que generar un sismo de $M=8.3$ lo cual no es razonable. Entonces para resolver este problema se debería a el sismo utilizado como FGE acercarse a el sitio de interés por algún método existente para generar la aceleración deseada y disminuir la magnitud. Esto provocaría que el acelerograma utilizado perdiera características de la fuente y no funcionara como una FGE como es el objetivo deseado. Por lo tanto se tomó la decisión que los resultados generados a partir de evento solamente se tomaran con fines ilustrativos. También en esta tabla se puede ver que el valor de la aceleración máxima que se produce en cada una de las simulaciones se encuentra relacionada con el valor de la caída de esfuerzos y el momento sísmico. Es decir, que existen diferentes valores de M_{oe} y $\Delta\sigma_e$ que pueden generar la misma aceleración máxima deseada.

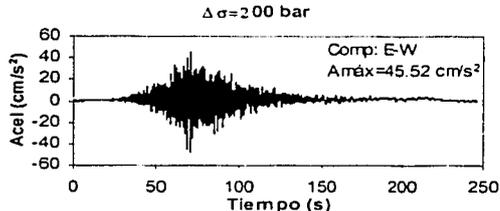
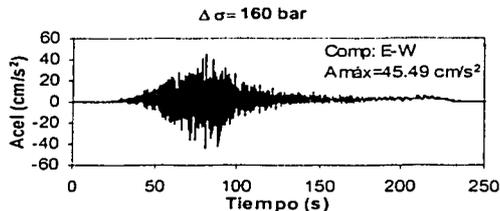
De las simulaciones se obtuvo la figura 4.3 en donde se presentan los acelerogramas sintéticos generados. En esta se observan los valores máximos de la aceleración registrada en los acelerogramas simulados que corresponde aproximadamente la aceleración máxima del suelo asociada a un periodo de retorno de 125 años obtenida anteriormente y presentada en la columna 4 de Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Datos de los sismos grandes hipotéticos cuya aceleración máxima de suelo en CU está asociada un $T_R=125$ años

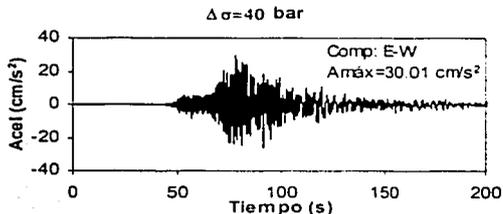
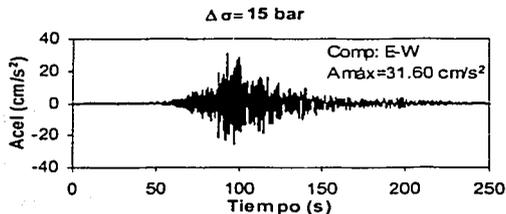
Evento	Sismo	Fuente	$a_{s\text{máx}}$	a_{se}	M_u	M_e	M_{oe}	$\Delta\sigma_e$
			cm/s ²	cm/s ²				
1	25/04/89	Subducción Ometepec	25.00	24.71	8.2	8.0	1.0×10^{28}	100
				24.81		7.7	0.36×10^{28}	150
2	23/05/94	Prof. Inter. Oeste	45.30	45.49	7.9	8.3	3.16×10^{28}	160
				45.52		8.2	2.35×10^{28}	200
3	15/06/99	Prof. Inter. Centro	30.20	31.60	7.88	7.7	3.74×10^{27}	15
				30.01		7.2	6.0×10^{26}	40
4	30/09/99	Oaxaca Nuevo	7.00	5.71	7.6	7.6	2.5×10^{27}	200
				6.97		7.6	2.2×10^{27}	225
5	21/07/00	Prof. Inter. Centro	45.30	30.46	7.88	6.7	1.0×10^{26}	300
				24.98		6.7	1.0×10^{26}	350



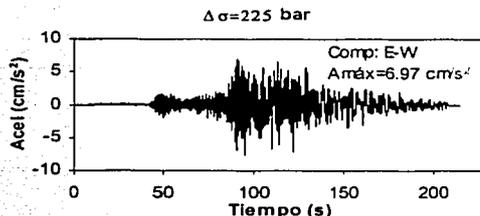
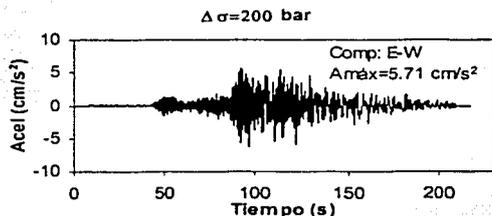
a) Sismo del 25 de Abril de 1989 en CU



b) Sismo del 23 de Mayo de 1994 en CU

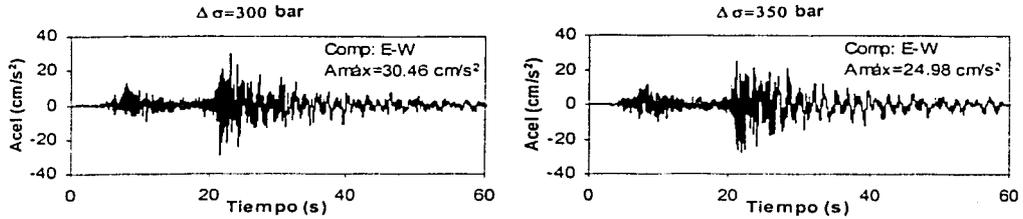


c) Sismo del 15 de junio de 1999 en CU



d) Sismo del 30 de Septiembre de 1999 en CU

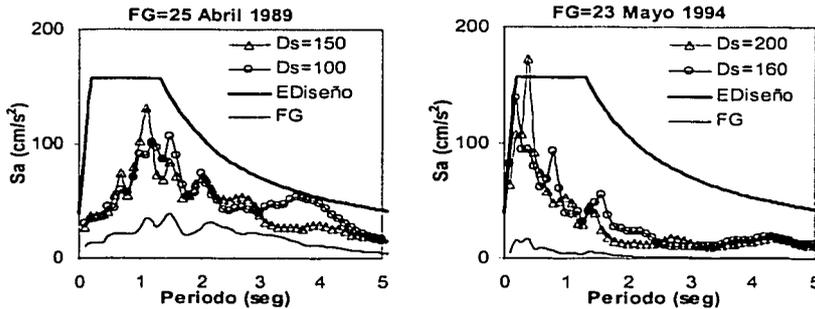
4.3 Acelerogramas simulados utilizando como FGE los eventos de la Tabla 4.1



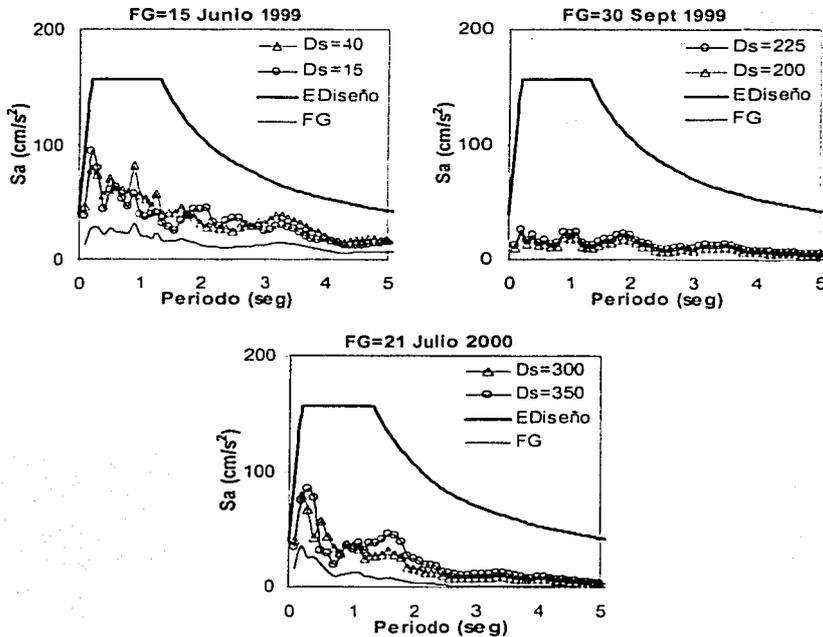
e) Sismo del 30 de Septiembre de 1999 en CU

4.3 (Continuación)

Se presentan en la figura 4.4 el espectro de diseño marcado en las NTCS (2002) y los de respuesta elásticos para un 5% del amortiguamiento crítico tanto de las simulaciones como de la FGE para la estación CU (Ciudad Universitaria) para dos diferentes caídas de esfuerzo. Se mantuvo la escala constante para tener una mejor apreciación y así poder hacer una comparación entre los diferentes eventos simulados con respecto a sus ordenadas espectrales. En esta se observa como los espectros simulados considerando que se presente la misma aceleración máxima de suelo en el CU generan espectros de respuesta de intensidades similares independientemente de la caída de esfuerzos y el momento sísmico que se tomaron. Es decir, que diferentes magnitudes de sismo en función de la caída de esfuerzos o momento sísmico pueden generar espectros de respuestas cuyas intensidades sean semejantes. Esto si la aceleración máxima de suelo asociada a un T_R en específico de cada acelerograma simulado en un sitio se mantenga constante (Tabla 4.2). También en esta figura se observa que las aceleraciones espectrales de los 5 eventos simulados quedan por debajo de las marcadas en las NTCS-2002.



4.4 Espectros de respuesta simulados utilizando como FGE los eventos de la Tabla 4.1. La simbología usada es Ds: son los espectros generados para diferentes $\Delta\sigma$ y Mos , Ediseño: es el espectro de diseño marcado en las NTCS-2002, FG: es el espectro generado a partir de la función de Green



4.4 (Continuación)

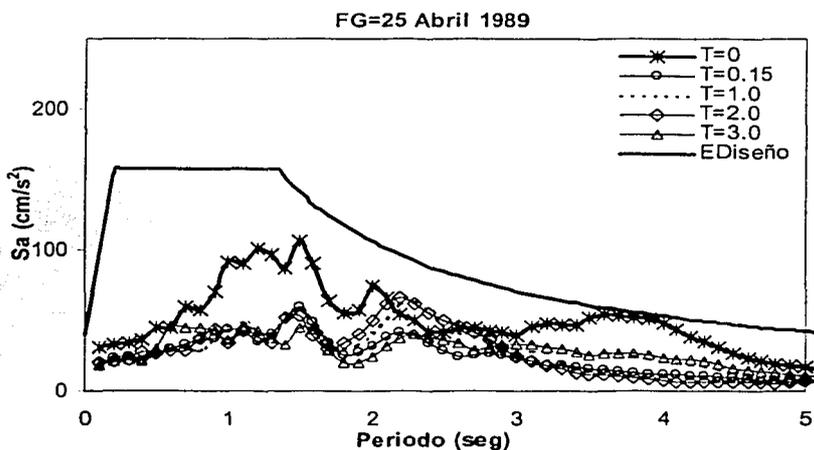
A continuación se realizó el procedimiento anterior con las siguientes modificaciones. En este caso se utilizaron como función de Green solamente los eventos 1 (25-abril-1989) y 2 (23-mayo-1994) de la Tabla 4.1. Se consideró que al generar el espectro de respuesta con un 5 % con los acelerogramas simulados, la ordenada para un periodo estructural en específica del espectro de respuesta correspondiera a un periodo de retorno de 125 años. La ordenada esperada para diferentes periodos estructurales se obtuvieron de las tasas de excedencia de aceleraciones para diferentes periodos estructurales ($T=0, 0.15, 1.0, 2.0$ y 3.0 s) y fuentes sísmicas (figura 4.2). La caída de esfuerzo ($\Delta\sigma$) se mantuvo constante para cada uno de los eventos y solamente se hizo variar el momento sísmico. Los resultados se muestran en la tabla 4.3. En esta tabla se muestran las intensidades esperadas para cada periodo estructural para un $T_R=125$ años ($a_{TR=125}$) y las intensidades obtenidas con los acelerogramas simulados. Así como la caída de esfuerzo ($\Delta\sigma$) y el momento sísmico (M_{oe}) utilizados para generar acelerogramas simulados cuya ordenada espectral para distintos periodos estructurales estuviera asociada a un $T_R=125$ años.

En la figura 4.5 se muestran los espectros de respuesta generados debido a distintos acelerogramas simulados en el sitio CU cuya ordenada espectral de un periodo estructural específico está asociado a $T_R=125$ años. Además se presenta el espectro de diseño marcado en las NTCS (2002) para este sitio. En esta figura se observa como al utilizar como FGE el evento 1 (25-abril-1989), el espectro de respuesta generado cuya aceleración máxima del suelo tenga un $T_R=125$ años abarca a los otros espectros. Y para el sismo en el que se utilizó como FGE el evento 2 (23-mayo de 1994), el espectro de

respuesta cuya intensidad en el periodo estructural $T=2$ s tuviera un $T_R=125$ años es el que abarca a los demás espectros.

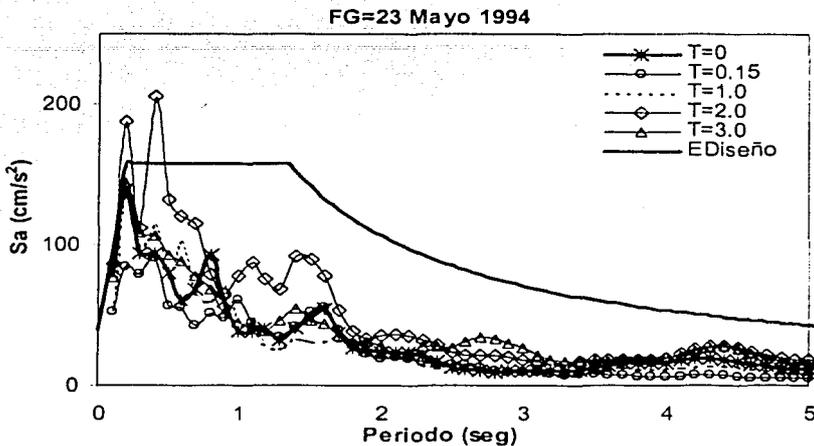
Tabla 4.2 Datos de los sismos grandes hipotéticos cuya aceleración máxima de suelo en CU está asociada un $T_R=125$ años

T_{est} s	Sismo 25/04/89 $\Delta\sigma=100$ bar				Sismo 23/05/94 $\Delta\sigma=160$ bar			
	$a_{TR=125}$ (cm/s^2)	$a_{registro}$ (cm/s^2)	M	M_{oe} (dina-cm)	$a_{TR=125}$ (cm/s^2)	$a_{registro}$ (cm/s^2)	M	M_{oe} (dina-cm)
0	25.00	24.71	8.0	1.00E+28	45.30	45.49	8.3	3.16E+28
0.15	23.90	23.06	7.5	1.80E+27	85.15	84.10	8.0	1.16E+28
1	45.40	45.88	7.6	2.90E+27	45.24	45.12	8.3	3.10E+28
2	51.92	50.23	7.5	2.00E+27	39.32	35.13	8.5	6.20E+28
3	34.02	33.28	7.5	2.00E+27	27.40	26.20	8.5	5.16E+28



4.5 Espectros de respuesta simulados utilizando como FGE los eventos de la Tabla 4.1.

Nota: Ediseño (Espectro de diseño marcado en las NTCS-2002)



4.5 (Continuación)

4.4 Simulación de espectros debido a sismos de falla normal y subducción

A partir de considerar como $F_i(T)$ los cocientes espectrales promedio más una desviación estándar obtenidos a partir de la ecuación (3.2) en el capítulo 3, y como $Sa_{cu}(T)$ los espectros de respuesta simulados en CU obtenidos anteriormente se procedió a simular los espectros de respuesta $Sa_i(T)$ usando la ecuación (4.6) para algunas estaciones del valle de México como son CD, SCT, 54 y 49, y compararlos con los espectros de diseño marcados en las nuevas normas técnicas complementarias sísmicas (NTCS-2002, apéndice A). Los acelerogramas utilizados para generar los espectros de respuesta fueron aquellos en la que la aceleración máxima del suelo en CU esta asociada a un $T_R=125$ años. Esta comparación se puede realizar debido a que los de espectros de diseño presentados en las nuevas NTCS fueron hechos contemplando un periodo de retorno de aproximadamente 125 años, tal y como los espectros de respuesta simulados realizados en este trabajo (figuras 4.6 a 4.10). En la figura 4.6 se observa que para los sismos postulado de $M=8.0$ y $=7.7$ con $\Lambda\sigma=100$ y 150 bar respectivamente, considerando como FEG el sismo del 25 de abril de 1989, el espectro de aceleraciones simulado hipotético para la estación SCT, 49 y CD ($T_s=1.9$ s) se encuentra por abajo de lo que está establecido en las NTCS-2002, es decir, que para esta estación los edificios nuevos sufrirán daño pero no deberán nunca a colapsar. Sin embargo para la estación 54 en Coyoacán ($T_s=1.1$ s) para periodos estructurales cercanos a 1 s, las aceleraciones sobrepasan a las marcadas por las NTCS, de lo cual se puede esperar que para edificios con un periodo estructural de 1.1 sufrirán graves daños e incluso podrían llegar a darse el colapso.

En las figuras 4.7 a 4.10 puede observar que en las estaciones SCT, 54, 49 y CD el espectro de diseño marcado por las NTCS resulta conservador para los eventos hipotéticos generados a partir de utilizar como FGE los sismos de falla normal. Se puede esperar que las estructuras no sufran graves daños estructurales.

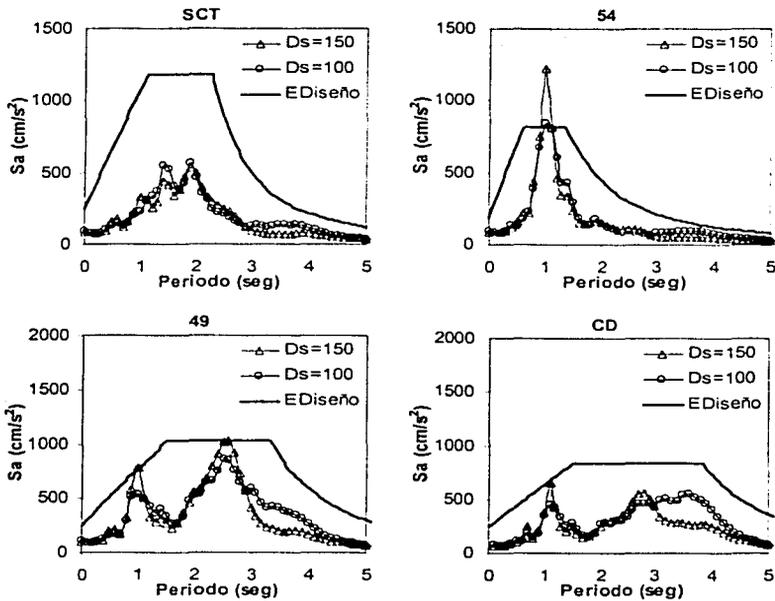


Figura 4.6 Comparación de espectro de diseño con respecto a los sismos hipotético utilizando como FGE el sismo del 25 de abril de 1989

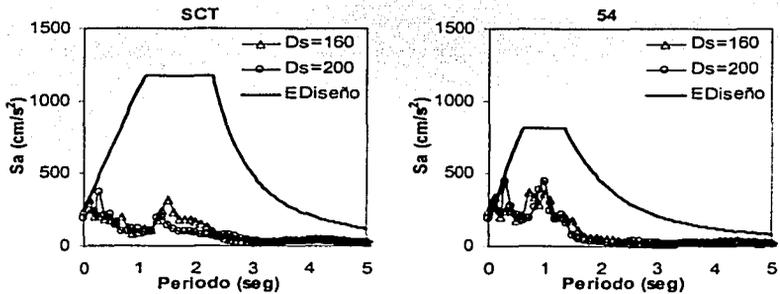


Figura 4.7 Comparación de espectro de diseño con respecto a los sismos hipotético utilizando como FGE el sismo del 23 de mayo de 1994

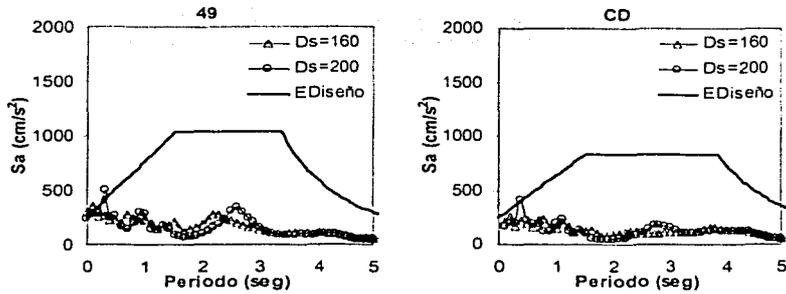


Figura 4.7 (Continuación)

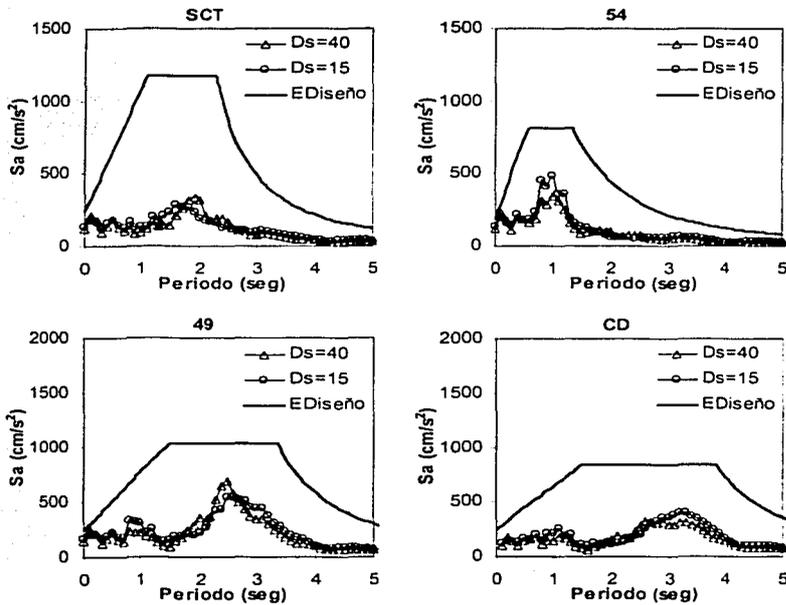


Figura 4.8 Comparación de espectro de diseño con respecto a los sismos hipotético utilizando como FGE el sismo del 15 de junio de 1999

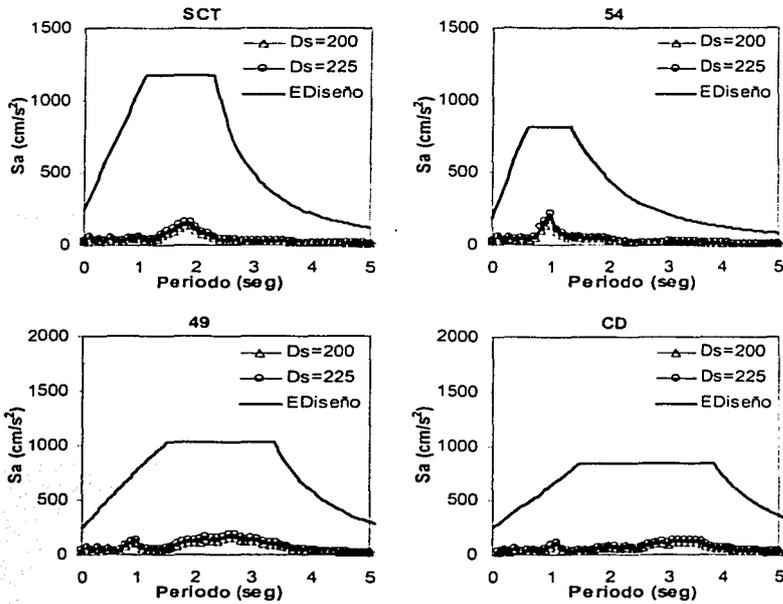


Figura 4.9 Comparación de espectro de diseño con respecto a los sismos hipotético utilizando como FGE el sismo del 30 de septiembre de 1999

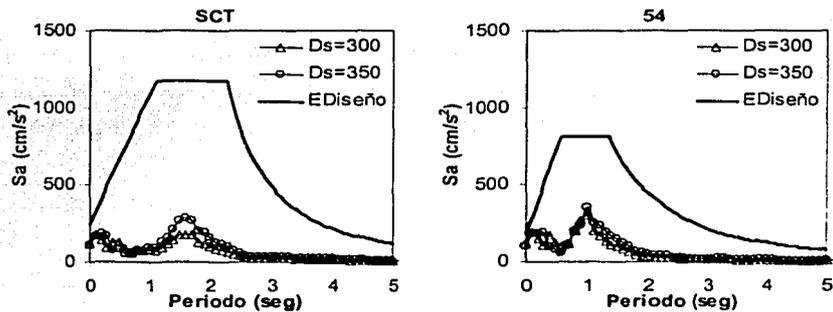


Figura 4.10 Comparación de espectro de diseño con respecto a los sismos hipotético utilizando como FGE el sismo del 21 de julio de 2000

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

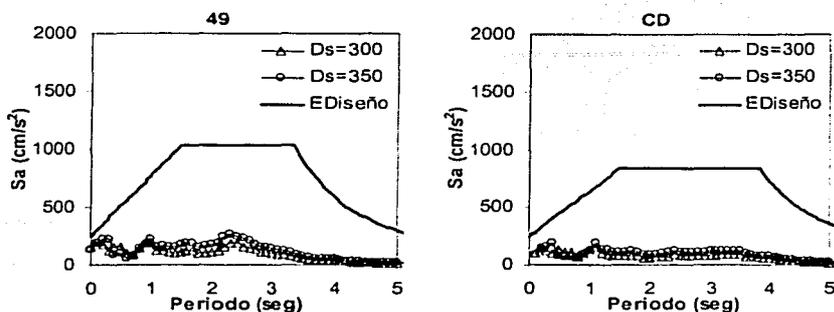


Figura 4.10 (Continuación)

La observaciones en resumen más relevantes que se pueden mencionar son las siguientes:

- Para periodos estructurales cercanos a 1 s como es la estación 54, las aceleraciones máximas de un oscilador de un grado de libertad que se llegarían a presentar llegan a sobrepasar ligeramente las aceleraciones espectrales de diseño establecidas por las NTCS (2002) en el apéndice A. Estas aceleraciones se presentan para el sismo simulado de subducción tomando como FGE el sismo del 25 de abril de 1989 (subducción). Es decir, para grupos de estructuras cercanas a este periodo tendrían una sollicitación mayor a las que fueron diseñadas.
- Puede verse que el valor de la aceleración máxima que se produce en cada una de las simulaciones se encuentra directamente relacionado con el valor de la caída de esfuerzos y el momento sísmico seleccionada. Por lo que es necesario seguir estudiando una determinación más confiable del momento sísmico y la caída de esfuerzo, porque ésta puede cambiar de una zona a otra, así como también depende del tipo de origen del sismo de falla normal o subducción.

Capítulo 5

Espectros de aceleración en la ciudad de México para distintos periodos de retorno

En esta parte de la tesis se generan espectros de aceleraciones para diversos periodos de retorno en el valle de México utilizando el procedimiento marcado por Ordaz *et al.* (2000) para la determinación de espectros de diseño por sismos para el DF y se comparan con los obtenidos por Reyes *et al.* (2002). Esto se hace no sólo para un sismo de gran intensidad (periodo de retorno de 125 años) para proteger a la estructura del colapso, sino también ante sismos de menor intensidad que ocurren con mayor frecuencia (periodos de retorno menores de 30 años), con el fin de evitar daño tanto en los elementos no estructurales como estructurales. Al final se proponen algunas expresiones algebraicas para el cálculo de espectros de diseño para diferentes periodos de retorno ($T_R=10, 15$ y 20 años).

5.1 Espectros de aceleraciones en CU registrados durante 37 años

La estación de Ciudad Universitaria (CU) de la Ciudad de México (capítulo 2) es el sitio en donde se han registrado la mayor cantidad de eventos desde 1964. Algunos de estos eventos se usarán para calcular la tasa de excedencia de aceleración, es decir el número de veces que se excede una aceleración por unidad de tiempo. La tasa de excedencia de aceleración se obtiene para diferentes periodos estructurales en CU, mediante la ecuación:

$$v_i(a)_{real} = \frac{N(A > a)}{t} \quad (5.1)$$

$N(A > a)$ es el número de veces que se excede la aceleración A

t es el periodo de observación de los eventos (años)

$v_i(a)_{real}$ es la tasa de excedencia de una aceleración

Primero se realiza una revisión de la calidad de algunos de los sismos registrados en el sitio de CU durante estos últimos 37 años para las componentes Norte-Sur (NS), Este-Oeste (EW) y Vertical (V) aunque esta última no se usará para los fines de esta tesis. Algunas características de los eventos utilizados se pueden ver en la Tabla 2.1 marcados con la observación número 8. Esta información en el sitio CU es extraordinaria porque existen pocos lugares en el mundo que tienen tanto tiempo registrando sismos en un sitio con buena calidad.

Con los anteriores eventos se estimaron los espectros de respuesta de aceleraciones en el sitio CU que representan los valores de respuesta máxima de varios osciladores caracterizados por su periodo natural de vibración y por un amortiguamiento dado, usualmente 5 por ciento del amortiguamiento crítico (AC).

Existen evidencias de que ante un evento ya sea de gran o menor intensidad el periodo dominante de la respuesta se modifica de acuerdo a la intensidad en el tiempo a la que este sometido la estructura (Torres *et al.* 1997). Así como de porcentaje de AC de acuerdo a varios factores como el material (acero, concreto reforzado, concreto presforzado), el tipo de unión (soldada, atornilla en el caso de estructuras de acero), la configuración de la estructura (regular o irregular), calidad de los materiales, etc. La determinación del periodo de la estructura depende generalmente de la habilidad, criterio y experiencia del estructurista para considerar qué tan valido es el periodo estructural que obtuvo del

análisis. Esto no sucede en el porcentaje del amortiguamiento crítico que tiene la estructura. Este porcentaje generalmente se toma como el 5 por ciento (este porcentaje puede variar del 2 al 6 %). Este porcentaje de AC se puede considerar válido cuando se diseña la estructura ante sismos de gran intensidad es decir para el *estado límite de resistencia última*, pero este porcentaje de AC debe ser menor al momento de diseñar la estructura ante sismos de menor intensidad porque no debe existir daño en los elementos estructurales y no estructurales para cumplir con el *estado límite de servicio*, debido a que ante estos sismos de baja intensidad la degradación del material debe ser mínima.

Existen estudios experimentales acerca de porcentaje del AC donde varía de 2 al 10 % dependiendo de varios factores. Cinco por ciento del AC es el que se ha utilizado en los reglamentos del mundo, por lo que en este trabajo se utilizará 5 por ciento.

En la figura 5.1 se muestran los espectros de respuestas (eventos marcados con 8 de la Tabla 2.1) debido a sismos de subducción, falla normal e intraplaca calculados para 5 por ciento de amortiguamiento para ambos componentes NS y EW. En esta figura se puede observar que para la mayoría de los eventos la aceleración máxima no excede de 40-60 cm/s^2 , y solamente los eventos 12 (19/sep/85, subducción) y 5 (12/jun/74, intraplaca) sobrepasan esta aceleración. Sobre el evento 12 se comentó anteriormente sobre los efectos destructivos en la ciudad de México (capítulo 2). El evento 5 es un sismo de intraplaca que ocurrió muy cerca de CU y solamente fue registrado por este sitio CU. De este evento no se tiene información que haya causado algún daño en zona de lomas o de transición, pero si observamos la intensidad que presentó para periodos cortos esta resulta importante, debido a que alcanzó intensidades semejantes a las presentadas durante evento 12 para periodos alrededor de 1.2 s en CU en dirección EW.

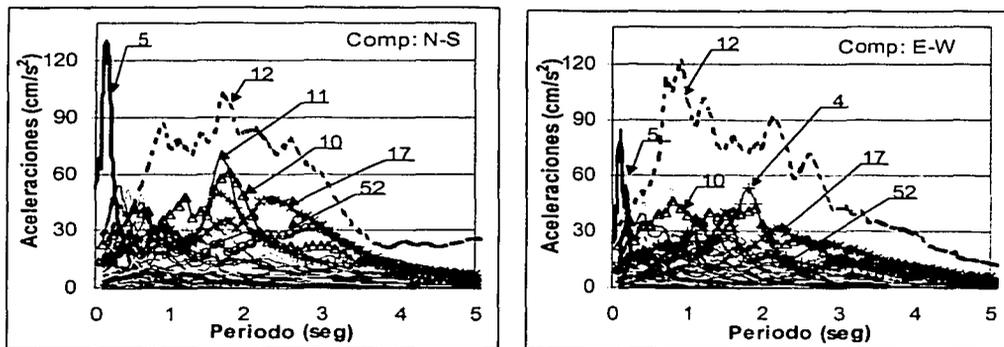


Figura 5.1 Espectros de respuesta para CU para un porcentaje de 5%

Posteriormente con ayuda de estos espectros de aceleración en el sitio CU y la ecuación 5.1 se calcularon las tasas de excedencia de aceleraciones para el sitio CU reales considerando todos los eventos de la Tabla 2.1 que tiene como observación el número 8. Las tasas de excedencia obtenidas se compararon con las realizadas por Ordaz y Reyes (1999) en el que hacen una evaluación del peligro sísmico debido a sismos de subducción ocurridos en las costas del Pacífico mexicano que afecta a la ciudad de México considerando un proceso de generación de temblores tipo Poisson y con la de Ordaz (2000) en el que toma en cuenta las tasas de excedencia de eventos de falla normal. Esto se puede

observar en la figura 5.2 en la que se presentan las tasas de excedencia de aceleraciones para diferentes periodos de suelo en el sitio CU. En esta figura se puede ver que realmente existe una gran semejanza de la calculada a través de funciones de atenuación (presentadas recientemente por Reyes *et al.* 2002) y la observada.

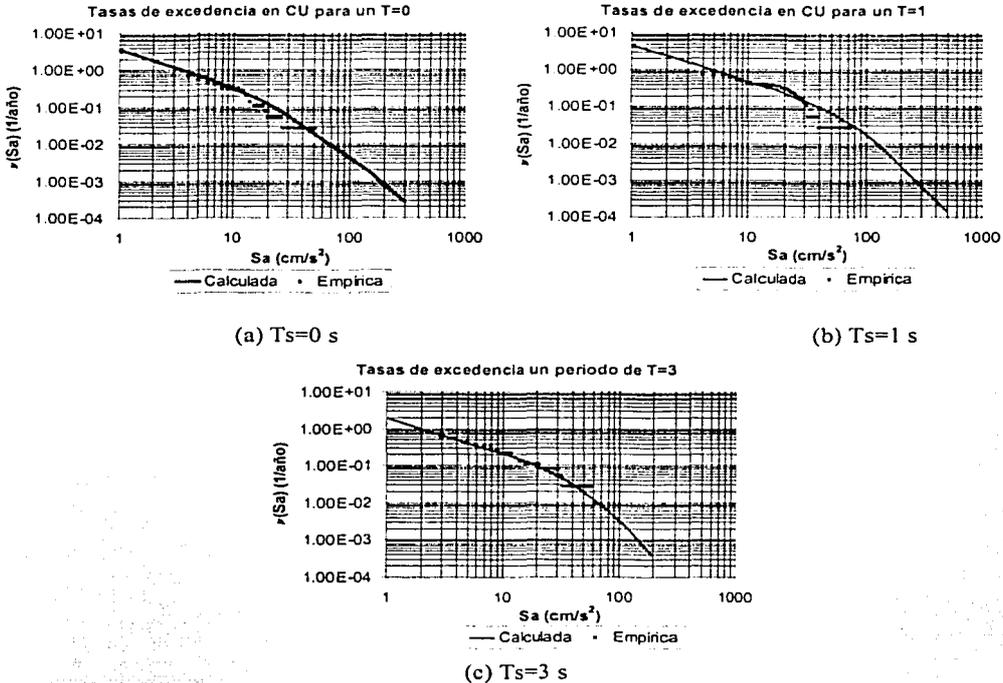


Figura 5.2 Tasas de excedencia de aceleraciones para distintos periodos de suelo en CU

5.2 Espectros de peligro uniforme en CU

Para la determinación de los espectros de peligro uniforme en CU para diferentes periodos de retorno T_R , es decir, espectros cuyas ordenadas espectrales tienen las mismas probabilidades de excedencia en un lapso dado, se utilizó el Programa Crisis 2000 el cual considera la gran mayoría de las fuentes sísmicas como son sismos de falla normal y los sismos de subducción (en este programa falta incluir los sismos que pueden generarse en el eje volcánico). A continuación se hace una breve descripción de la forma en que trabaja el programa Crisis 2000 utilizado (Ordaz, 2002).

Se calculan las curvas de tasa de excedencia de las ordenadas espectrales de interés (periodos entre 0 y 5 s) para Ciudad Universitaria (CU) (Figura 5.2). Para esto se utilizan las leyes de atenuación de Reyes (1999), desarrolladas específicamente para ese sitio que considera los sismos de subducción de la costa del pacífico, y de Ordaz (2002), para considerar los sismos de falla normal. La estación CU es el sitio de referencia para estudiar los sismos en el valle de México en particular para el cálculo de tasas de excedencia y espectros de peligro uniforme en otros sitios de la ciudad de México. En la Tabla 5.1 se

presentan en la primera columna los periodos estructurales para las cuales las aceleraciones fueron calculadas, en las siguientes columnas se presentan los diferentes periodos de retorno y las aceleraciones para cada periodo estructural respectivamente.

Tabla 5.1 Valores de aceleraciones en cm/s^2 , para distintos periodos de retorno para CU

Espectro de peligro en CU para diferentes periodos de retorno							
T(s)	$T_R=5$	$T_R=10$	$T_R=15$	$T_R=20$	$T_R=25$	$T_R=30$	$T_R=125$
0.01	13.9	21.8	27.2	31.4	35.1	38.5	75.5
0.15	26.3	41.1	52.6	62.7	71.7	80.1	182.0
0.30	26.7	41.1	51.9	61.2	69.1	76.2	162.0
0.50	24.1	37.9	47.4	55.6	62.8	68.6	134.0
1.00	22.6	38.4	49.7	59.6	66.7	72.2	131.0
2.00	18.2	31.7	42.0	49.0	54.4	59.2	106.0
3.00	10.9	19.7	25.5	30.6	35.0	38.1	71.2
4.00	6.0	10.8	14.0	16.9	19.3	21.2	42.3
5.00	3.7	7.1	9.7	11.8	13.5	15.1	33.2

En la figura 5.3 se presenta el espectro de peligro uniforme para el sitio CU con periodos de retorno de 5, 10, 15, 20, 25, 30 y 125 años. En esta figura se puede observar que para CU la aceleración máxima esperada para un periodo de retorno de $T_R=125$ años ocurre para un periodo de $T=0.3$ s y se debe a los sismos de falla normal, pero para periodos de retorno menores de $T_R=30$ años la diferencia es menor. El segundo máximo, se presenta para un periodo alrededor de $T=1$ s que está producido por los grandes temblores costeros, es decir, sismos de subducción (Ordaz, 2000).

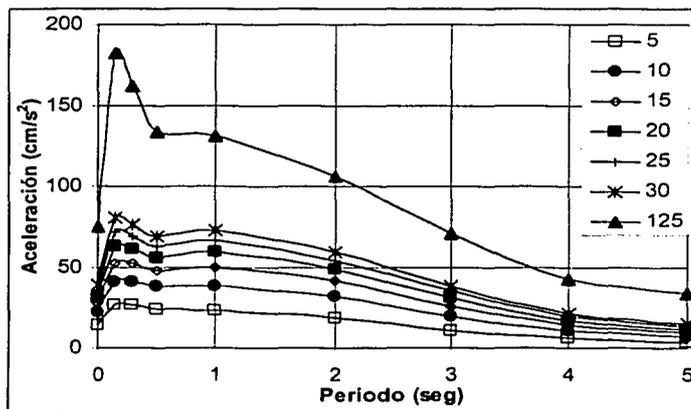
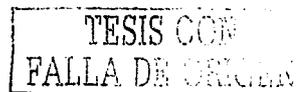


Figura 5.3 Espectros de peligro uniforme para diferentes periodos de retorno en el sitio de CU

Comparando las intensidades en CU obtenidas en esta tesis (Figura 5.3) con el trabajo presentado por Reyes *et al.* 2002 se observa que en sus cálculos no se presenta la intensidad máxima para un periodo de 0.3 s. Además que las intensidades presentadas en esta tesis resultan mayores para un rango de periodos de 0.01-2 s en los diferentes periodos de retorno. Esto debido a que se están considerando ambos tipos de sismos (subducción y falla normal) y no solamente se consideran eventos de tipo



subducción. Es decir, que las intensidades de los sismos de falla normal en el terreno firme de la ciudad de México pueden llegar a ser mayores a las generadas por sismos de subducción para periodos en el intervalo antes mencionado.

En la figura 5.4 se presentan los espectros de respuesta promedio de los eventos marcados con 8 de la Tabla 2.1 calculados con la expresión (4.10) y se comparan con los espectros de peligro uniforme antes calculados. En esta figura se puede observar que para los fines de este capítulo los periodos de retorno que nos interesa estudiar son los siguientes:

- $T_R = 125$ años. Este periodo de retorno ha sido propuesto por algunos investigadores para generar los espectros de diseño a partir de espectros de peligro sísmico uniforme (Ordaz *et al.* 2000) para incorporarlos a las NTCS-2002. Este T_R cubre los sismos con una probabilidad muy pequeña de ocurrencia que tienen gran intensidad, como son los eventos sísmicos 5 (12/jun/74), 12 (19/sep/1985) y 13 (21/sep/85).
- $T_R < 30$ años. A los espectros que abarquen los sismos frecuentes de baja intensidad que ocurren con mayor frecuencia se llamarán espectros de servicio. Con este espectro de servicio se pretende que la estructura permanezca elástica y con desplazamientos limitados ante la ocurrencia de un sismo de baja intensidad. Sin embargo el T_R , para considerar que un espectro cumpla con estas características continua en investigación. En la figura 5.4 también se observa que para todos los eventos de la Tabla 2.1 marcados con 8 las intensidades son contenidas dentro de un $T_R = 10$ años. Exceptuando los eventos 5, 12 y 13 por las razones anteriormente mencionadas y los eventos 10 (14/marzo/1979), 11 (07/junio/1982) y 17 (25/abril/1989) que superan las intensidades para este periodo de retorno en un intervalo de periodo estructural de 1.5 a 3.0 s pero cuyas intensidades son abarcadas por un $T_R = 20$ años.

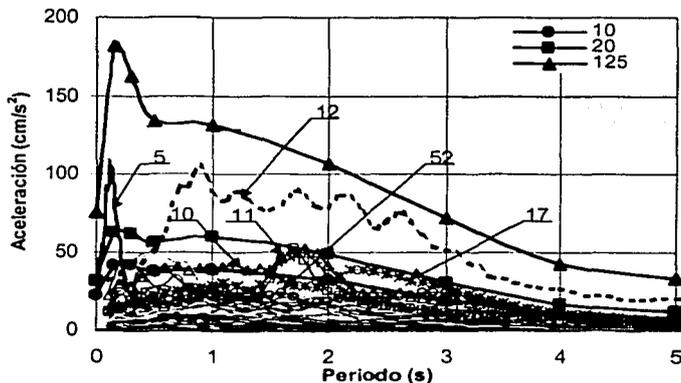


Figura 5.4 Comparación de espectros de peligro sísmico para diferentes periodos de retorno y espectros de respuesta registrados (1964-2001) en CU

Reyes (1999) a través de un método de optimización de periodos de retorno de diferentes estructuras y analizando otros estudios establece que cada estructura tiene un periodo de retorno óptimo de servicio propio, es decir, estructuras de 3 niveles de mampostería llegan a tener periodo de retorno de óptimo de servicio de 125 años, pero estructuras a base de marcos de concreto con 15 niveles el periodo de

retorno óptimo de servicio es de 10 años. Este método que propone para diseñar por servicio a través de encontrar periodos de retorno óptimos de servicio es adecuado para estructuras que salgan de estructuras comunes que existen en la ciudad de México como son estadios, universidades, edificios públicos, edificios en los cuales el contenido es más importante que la estructura misma. Pero para estructuras que son más comunes como casas, edificios de menor nivel es necesario establecer límites más claros en el reglamento como algunas cláusulas en donde se indique que a menos que se hagan estudios más a fondo el periodo de retorno de servicio podría ser mayor de 30 años. Porque como hemos observado anteriormente, este límite abarca la mayoría de los sismos de menor intensidad que han ocurrido en CU a lo largo de 37 años. A continuación se realizarán más estudios para encontrar un límite más adecuado de acuerdo a los datos con que se cuentan hoy en día.

Mediante un análisis simple se trata de establecer que el espectro de peligro uniforme que se puede considerar apropiado se encuentra entre un periodo de retorno de $T_R=10$, $T_R=20$ ó $T_R=30$ años para cubrir los sismos que pudieran ocurrir y que se consideran como sismos de servicio en CU. Para ello se calcularon espectros de peligro sísmico empíricos que se obtuvieron de manera muy sencilla debido a que se cuenta con las tasas de excedencia de aceleraciones empíricas para diferentes periodo del suelo, y simplemente se escogía para que periodo de retorno y que periodo de suelo se requería la aceleración. Estas se comparan con los espectros de peligro uniforme teóricos calculados anteriormente. La principal razón para realizar esta comparación de espectros de peligro uniforme, es porque como se mencionó anteriormente, tenemos 37 años de registros en el sitio CU y para fines prácticos el periodo de retorno de servicio para un espectro de servicio debe ser menor de 30 años. Esto porque hay que recordar que el espectro empírico se generó a partir de 37 años de registros en CU y que si estamos hablando de periodos de retorno de 10, 20 ó 30 años es confiable decir que en este análisis se encuentra implícitamente el sismo de servicio que se pudiera presentar.

Los resultados se presentan en la figura 5.5 en donde además de los espectros de peligro uniforme teóricos y los espectros de peligro uniforme empíricos obtenidos a través de la tasa de excedencia empírica para diferentes periodos de retorno se presentan los eventos 4 (02/Ago/68, Oaxaca Oeste, $M=7.4$), 10 (14/mar/79, Petatlan, $M=7.6$) y 11 (07/jun/82, Ometepe, $M=6.9$) todos ellos de origen de subducción. Estos tres eventos se seleccionaron porque como se observó en la figura 5.4 para la mayoría de los eventos de la Tabla 2.1 marcados con el número 8 (excepto evento 5 y 12) existe una buena correlación en todos los periodos de suelo para los periodos de retorno menores de 20 años no así para los periodos entre 1.5 y 2.0 segundos de estos eventos. Esta variación de las intensidades a lo largo de este rango de periodos se aprecia mejor en el pico que presenta el espectro de peligro uniforme empírico en este rango, el cual no se aprecia en el espectro de peligro uniforme teórico. También en esta figura se observa cómo disminuye esta variación en la intensidad esperada conforme aumenta el periodo de retorno (figuras 5.5a y 5.5b). Es decir, que para los sismos de subducción (excepto evento 12 y 13), así como todos los de sismos de origen de falla normal e intraplaca (excepto evento 5) son abarcados por espectros de peligro uniforme con un $T_R < 20$ años.

En la figura 5.6 se presentan nuevamente los espectros de peligro uniforme teóricos y empíricos en el sitio CU, además de los eventos 17 (25/abril/1989, $M=6.9$) y el 52 (14/sep/1995, $M=7.3$). Se escogieron estos eventos porque en Reyes (1999) se señalan indicios de que para diversos tipos estructurales comunes, el periodo de retorno óptimo para la Ciudad de México es de 10 años. Y debido a que las intensidades espectrales que presentaron estos dos eventos están asociados a este periodo de retorno de 10 años. Por lo tanto es cierto que un periodo de retorno de $T_R=10$ años abarca intensidades similares de estos sismos en CU, pero no pasa esto con los otros eventos antes mencionados en que el periodo de retorno más conveniente según los resultados mostrados en las figuras 5.4 a 5.6 es $T_R=20$ años para terreno firme. Entonces con estas ideas expuestas se observo que el periodo de retorno de servicio que resulta apropiado aplicar es un periodo de retorno que sea de 10 años o de 20 años para la

ciudad de México y generar con esto espectros de servicio. A continuación se realizará el mismo ejercicio anterior pero para otras estaciones del valle de México.

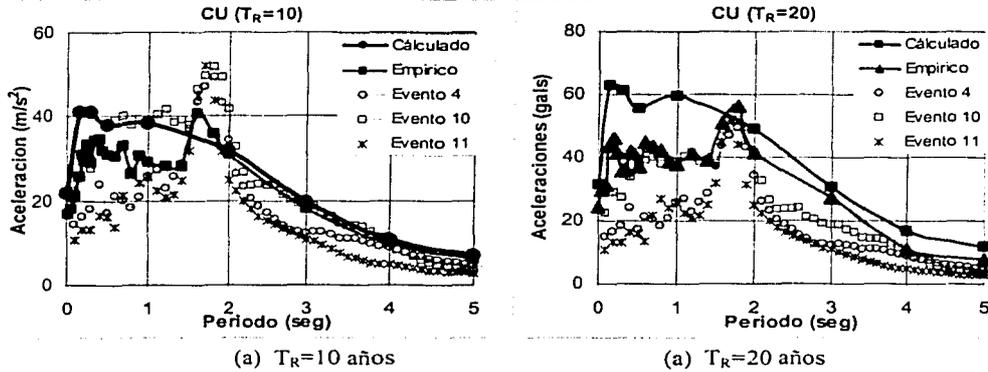


Figura 5.5 Comparación de Espectros de peligro uniforme entre el empírico y el calculado y eventos 4, 10 y 11

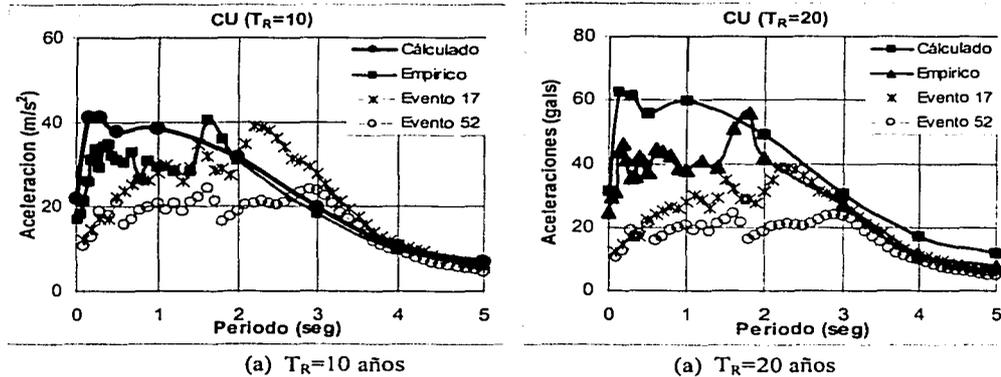


Figura 5.6 Comparación de Espectros de peligro uniforme entre el empírico y el calculado, y los eventos 17 y 52

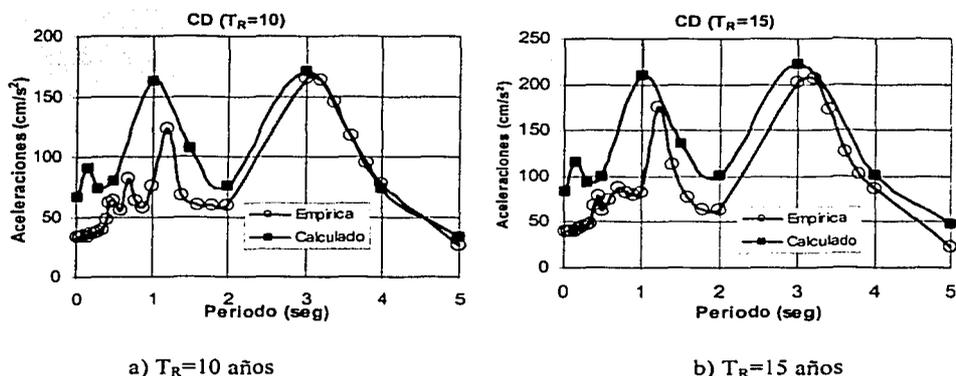
5.3 Espectros de peligro uniforme en otras estaciones de la Ciudad de México

Para observar qué pasa en otros lugares del valle de México y con ello tratar de encontrar un periodo de retorno T_R de servicio conveniente para la ciudad de México, se realiza una revisión con algunas otras estaciones acelerométricas del valle de México. En este caso se escogieron las estaciones Central de Abasto (CD), Centro Médico (49), Jardines de Coyoacán (54) y Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) las cuales tienen un periodo de observación registrados de 16 años.

Para realizar estos cálculos se tomaron como funciones de amplificación entre CU y estos sitios, los cocientes espectrales de respuesta obtenidos en el capítulo 3. Se calculó el espectro de peligro en cada sitio y se comparó con los espectros de respuesta con 5 % de AC que fueron registrados durante 16 años (marcados con el número 9 de la Tabla 2.1). En la figura 5.7 se muestran estos espectros para el sitio CD. En esta figura se puede observar cómo el espectro de peligro uniforme teórico calculado cubre totalmente al empírico, es decir, que mediante el espectro teórico calculado se generarían mayores intensidades en los sitios especialmente para periodos menores de 3 s en este sitio.

También se puede decir, que a pesar que como se observaba en la figura 3.34 del capítulo 3 que los cocientes espectrales presentan una gran incertidumbre en la amplificación, los espectros determinados de esta manera son sin embargo adecuados para generar espectros de peligro uniforme. Tomando en cuenta que para generar el espectro de peligro uniforme empírico es necesario manipular una gran cantidad de eventos y tener un periodo de observación grande. Y de la otra manera resulta más "sencilla".

Por lo tanto los espectros de peligro uniforme para diferentes periodos de retorno en los sitios antes mencionados se determinarán a partir de los espectros de peligro uniforme calculados en CU.



a) $T_R=10$ años
b) $T_R=15$ años
Figura 5.7 Comparación de espectros de peligro uniforme en el sitio CD

En la figura 5.8 se observan los espectros de respuesta de la estación CD con línea más delgada y los espectros de peligro uniforme para diferentes periodos de retorno. Los eventos usados en esta figura se pueden ver en la Tabla 2.1 marcados con el número 9. El espectro con periodo de retorno de $T_R=10$ años cubre los sismos que se han registrado durante estos 16 años y es solamente el evento 12 (19/sept/1985) y 13 (21/sept/1985) los que lo rebasan. El evento 12 esta asociado a un periodo de retorno aproximadamente de 125 años y el evento 13 a un $T_R \approx 20$ años para ciertos periodos, como se puede observar en esta figura.

En la figura 5.9 se presentan los espectros de respuesta generados para el sitio 54 con línea delgada y los espectros de peligro uniforme para diferentes periodos de retorno. Los espectros calculados para la estación 54 se pueden ver en la Tabla 2.1 cuya observación es la número 10. En esta figura se puede observar cómo es nuevamente el periodo de retorno $T_R=10$ años el que cubre los sismos que se han presentado durante estos últimos 16 años.

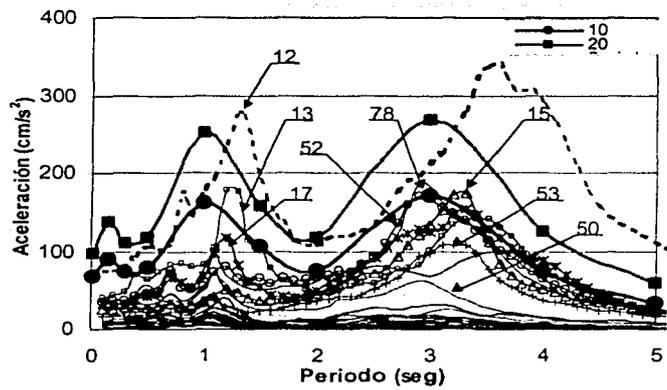


Figura 5.8 Espectro de respuesta en CD

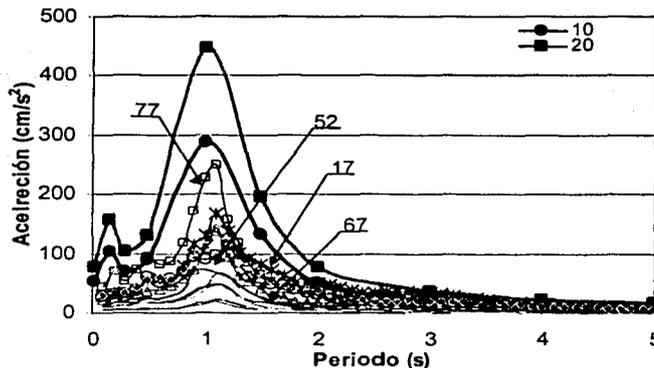


Figura 5.9 Comparación de espectros de respuesta en sitio 54 con espectros con diferente periodo de retorno

En la figura 5.10 y 5.11 se presentan los espectros de respuesta de la estación 49 y SCT respectivamente con línea más delgada y los espectros de peligro uniforme para diferentes periodos de retorno. Los eventos usados en esta figura se pueden ver en la Tabla 2.1 que están marcados con el número 11 y 12 respectivamente. En estas figuras 5.10 y 5.11 se observa como es el espectro con periodo de retorno de $T_R=10$ años el que cubre perfectamente los sismos que se han registrado durante estos 16 años y que sigue siendo solamente el sismo el evento 12 (19/sept/1985) el que lo rebasa, pero este sismo es cubierto por el espectro que tiene como periodo de retorno de $T_R=125$ años.

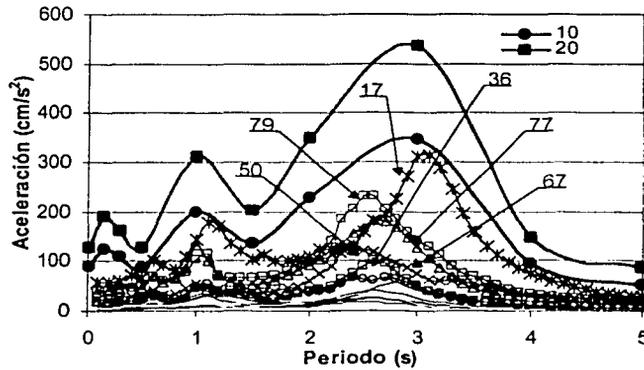


Figura 5.10 Espectro de respuesta 49

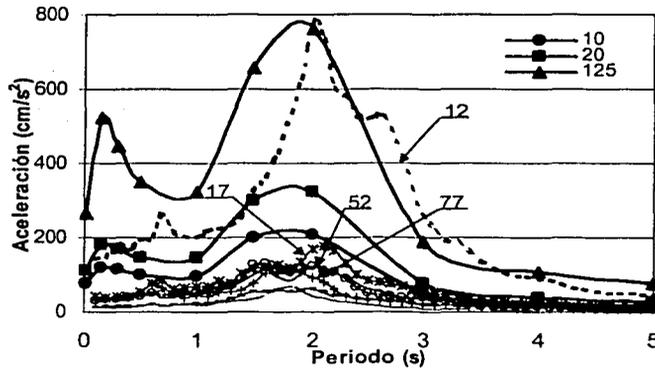


Figura 5.11 Espectro de respuesta SCT

Por lo tanto, de este análisis se confirma que el periodo de retorno que resulta apropiado para abarcar la mayoría de los sismos cuyas intensidades que generan se consideran como de servicio, es un periodo de retorno de $T_R=10$ años como lo habían mencionado algunos investigadores (Reyes, 1999 y Ordaz *et al.* 2000). Otra observación que se hace con respecto a las intensidades para diferentes periodos de retorno presentadas en este trabajo, es que estas resultan mayores a las que presenta Reyes *et al.* 2002 debido a que ese trabajo no considera en sus resultados los sismos de falla normal para calcular las tasas de excedencia en CU. Además que los cocientes de espectros de respuesta (CER) utilizados en ese trabajo solamente consideran un promedio pesado de los eventos y no con una desviación estándar como se realizó en este trabajo.

A continuación se evaluarán con el periodo de retorno propuesto de $T_R=10$ años algunos edificios instrumentados con lo que se trata de justificar que tan adecuado es tomar este T_R . Es decir, a través de

un procedimiento se determina si las aceleraciones que se presentan en distintos edificios de la Ciudad de México corresponden a aceleraciones de un periodo de retorno de 10 o 20 años.

5.4 Aceleraciones en algunos edificios para que se presente una distorsión límite de servicio

El criterio del nuevo reglamento del DF en el apéndice A, sección A.4 en la revisión de desplazamientos laterales para el diseño sismorresistente de edificios establece los límites que deben tener los edificios ante condiciones de servicio para la limitación de daños a elementos no estructurales las diferencias entre los desplazamientos laterales de pisos consecutivos producidos por las acciones sísmicas, no excederá de 0.002 veces las diferencias de elevaciones correspondientes. Salvo que no haya elementos incapaces de soportar deformaciones apreciables, como muros de mampostería. Estos estarán separados de la estructura principal de manera que no sufran daños por sus deformaciones; en tal caso, el límite en cuestión será de 0.004. Estos límites fueron resultado de una investigación bibliográfica que realizó Reyes (1999) tomando como base diversos estudios que se han realizado en el mundo para la determinación de límites de daño. Algunos de estos resultados son de edificios instrumentados y otros de pruebas experimentales.

5.4.1 Determinación de la aceleración de servicio en edificios instrumentados

A través de algunos edificios instrumentados en la ciudad de México (Tena, 1997) se establece un procedimiento que resulta simple para determinar el valor de la aceleración en el momento en que se puede presentar la distorsión bajo condiciones de servicio, y revisar si se cumplen los anteriores periodos de retorno propuestos ($T_R=10$ ó $T_R=20$).

El procedimiento consiste en que a partir de un edificio instrumentado ante un evento sísmico y los datos de periodo del suelo (T_s) donde está desplantado el edificio (permanece constante ante cualquier evento), el periodo de edificio (T_E) y la aceleración máxima tanto del suelo (A_s) como en la azotea (A_A) en una y otra dirección ante el evento sísmico (figura 5.12). Se propone obtener la distorsión del edificio considerando todo la estructura como un sistema de un grado de libertad, en el que la contribución de los modos superiores no se toma en cuenta. Esto se realiza como a continuación se muestra, reconociendo que existe incertidumbre en la determinación de dicha distorsión y que este desconocimiento no se puede evaluar numéricamente y por lo tanto este ejercicio se realiza solamente para fines académicos.

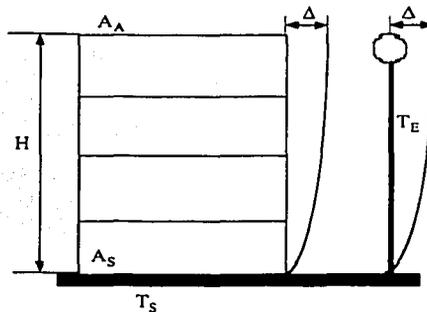


Figura 5.12 Sistema de varios grados de libertad y un sistema de un grado de libertad

Teniendo los datos anteriores del edificio instrumentado, se sustituyen en la expresión (5.2) con la que se obtiene el desplazamiento en la azotea (Δ) debido a un evento cualquiera.

$$\Delta = \frac{A_A}{\Omega^2} \tag{5.2}$$

donde:

A_A es la aceleración de la azotea

$\Omega = \frac{2\pi}{T_E}$ es la frecuencia natural de vibrar

Sustituyendo en la ecuación (5.3) se calcula la distorsión global que presentó el edificio ante una cierta aceleración máxima en la azotea.

$$Dist = \frac{\Delta}{H} \tag{5.3}$$

Posteriormente se obtienen todas las distorsiones posibles del edificio para cada evento sísmico relacionado con la aceleración máxima de la azotea. A través de una regresión lineal se obtiene una ecuación para cada dirección del edificio (transversal y longitudinal) que relaciona una distorsión y una aceleración. Entonces sustituimos la distorsión de entrepiso permisible de servicio (0.002 ó 0.004 según sea el caso) que marca el nuevo reglamento en el Apéndice A. Esto no se debe hacer así, pero como se menciona anteriormente este ejercicio se hace solo con fines académicos con el propósito de obtener cual sería el valor de la aceleración que provoca dicha distorsión, y compararlo con las aceleraciones que provoca el considerar un periodo de retorno de $T_R=10$ ó 20 años. Es decir, se realiza para conocer de qué orden son las aceleraciones de servicio que se presentan en algunos edificios y si estas cumplirían con las distorsiones que marcan las nuevas NTCS (2002).

Esto se puede hacer gracias a que la mayoría de los edificios que se presentan aquí, fueron instrumentados después del sismo de 1985, es decir, que las intensidades de los que se han presentado después de este evento deben generar niveles de intensidades que se deben considerar dentro de un rango de servicio. Como se muestra en la figura 5.13 el edificio debe permanecer para bajos niveles de esfuerzo en el comportamiento elástico.

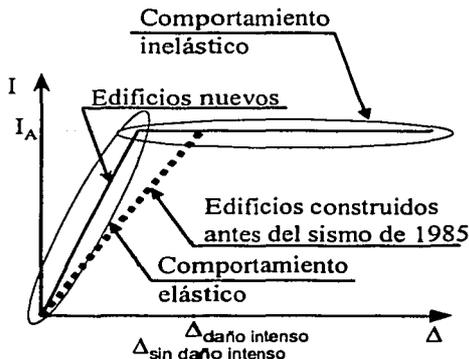


Figura 5.13 Rango elástico de los edificios nuevos y viejos

Hay que tomar en cuenta que la experiencia obtenida de registros sísmicos en edificios instrumentados ha mostrado que los sistemas estructurales presentan comportamiento no lineal durante movimientos sísmicos intensos e inclusive moderados (Torres *et al.* 1997). Esto se puede observar en el edificio Jalapa, que ha sufrido sismos de intensidad alta como el evento de 1985, pero incluso distorsiones de servicio permisibles son fácilmente rebasadas ante intensidades moderadas. Esto se puede deber como se muestra en la figura 5.13 a que la pendiente esfuerzo deformación ha cambiado, debido a que el edificio ha experimentado daño, es decir, ha incursionado en el comportamiento no lineal. Por lo tanto se puede decir que para edificios que hayan evidenciado un claro comportamiento no lineal como son una gran parte de los edificios que se construyeron antes del sismo de 1985 probablemente no podrán cumplir con las distorsiones de servicio permisibles en el nuevo reglamento, debido a que ante una aceleración menor la distorsión aumenta mucho más que en un edificio nuevo.

A continuación se aplica el procedimiento descrito anteriormente para algunos edificios instrumentados en la ciudad de México. En la Tabla 5.1 se resumen algunas de las principales características de estos edificios instrumentados (Tena, 1997). En la primeras cuatro columnas se da el nombre del edificio como está marcado en la referencia de Tena (1997), se nombran algunos de los eventos de diferentes intensidades a los cuales ha estado sometida la estructura y la frecuencia y el periodo del suelo donde está desplantada. Los eventos se escogieron por la disponibilidad de datos. En las siguientes seis columnas se presenta la frecuencia y el periodo de vibrar del edificio en cada dirección y la aceleración máxima en la azotea en cada dirección del edificio Transversal (T) y Longitudinal (L). En las cuatro últimas columnas se presenta el desplazamiento máximo ante cada evento obtenido a partir de la ecuación (5.2) y la distorsión a partir de la ecuación (5.3) en ambas direcciones. Y en la última columna se presenta la aceleración que se espera genere la distorsión máxima permisible por el nuevo reglamento bajo condiciones de servicio (NTCS-2002). Esta aceleración se obtuvo a través de realizar una regresión lineal y obtener una ecuación que representara la relación aceleración-distorsión para cada dirección mediante el procedimiento anteriormente descrito. Con lo que la aceleración de servicio para cada estructura se obtiene simplemente de sustituir en cada expresión obtenida la distorsión permisible de 0.002 ó 0.004 según sea el caso y considerar que la dirección que rige a la estructura es donde se presenta la mayor aceleración de servicio o bien aquella en donde la pendiente es más grande. Esto puede ser apreciado mucho mejor en la figura 5.14.

En esta figura 5.14 se presentan las ecuaciones obtenidas de la regresión lineal para cada dirección (T=transversal o L=longitudinal) y cada estructura presentada en la Tabla 5.1. Además del valor del coeficiente de correlación R^2 que es una medida del grado de dependencia lineal que existe entre dos variables. Es decir, que en la medida en que la relación tiende a ser lineal el R^2 se acerca a 1. Como se puede observar en los edificios PI (Torre I y Torre IV) en la dirección transversal el valor de R^2 esta en intervalo de 0.41-0.51 es decir que los valores se encuentran más dispersos de la ecuación obtenida y en la dirección transversal el valor de R^2 esta en 0.83-0.84. En cambio para otras estructuras como son SEC3, IMP, IMSS (central y cuerpo lateral), MJ y PC el valor de R^2 se encuentra en 0.995-0.999. Esto significa que durante los eventos sísmicos (registrados instrumentalmente) a los que ha estado sometido la estructura, esta ha permanecido en el comportamiento lineal.

Tabla 5.1 Aceleración posible en algunos edificios de la ciudad de México para que se presente la distorsión permisible de servicio del Reglamento de la Ciudad de México

Edificio	Sismo	Terreno		Datos generados para cada estructura												Distorsión	Aceleración	
		F Hz	T s	F (Hz)		T s		A _Δ		Δ		Distorsiones		L	T			
				L	T	L	T	L	T	L	T	L	T					
PI (Torre IV)	15/05/93	2.00	0.50	0.62	0.61	1.61	1.64	15	15	0.99	1.02	0.0002	0.0002	0.002	209	504		
	10/12/94			0.72	0.71	1.39	1.41	23	21	1.12	1.06	0.0002	0.0002					
	09/10/95			0.65	0.64	1.54	1.55	10	16	0.60	0.97	0.0001	0.0002					
	Prom. Periodo						1.53											
PI (Torre I)	15/05/93	2.00	0.50	0.62	0.5	1.61	2.00	8	14	0.53	1.42	0.0002	0.0004	0.002	174	256		
	10/12/94			0.62	0.6	1.61	1.67	15	22	0.99	1.55	0.0003	0.0005					
	09/10/95			0.55	0.48	1.82	2.08	14	12	1.17	1.32	0.0003	0.0004					
	Prom. Periodo				1.68		1.92											
IMP	31/05/90	1.43	0.70	0.95	1.72	1.05	0.58	22.58	17.03	0.63	0.15	0.0003	0.0001	0.002	153	236		
	15/05/93			0.94	1.75	1.06	0.57	27.84	10.24	0.79	0.08	0.0004	0.0000					
	24/10/93			1.00	1.75	1.00	0.57	44.71	19.29	1.13	0.16	0.0006	0.0001					
	10/12/94			0.96	1.82	1.04	0.55	44.16	14.04	1.21	0.11	0.0006	0.0001					
	14/09/95			0.93	1.72	1.08	0.58	75.41	50.69	2.23	0.43	0.0011	0.0002					
	09/10/95			1.07	1.74	0.93	0.57	12.79	8.48	0.28	0.07	0.0001	0.0000					
Prom. Periodo				1.02		0.57												
SEC3	08/02/88	0.45	2.22	4.35	3.42	0.23	0.29	6	7	0.01	0.02	0.00001	0.00002	0.002	1547	255		
	10/10/94			4.625	3.165	0.22	0.32	19	16	0.02	0.04	0.00002	0.00004					
	14/09/95			4.58	2.075	0.22	0.48	45	36	0.05	0.21	0.00006	0.00023					
	09/10/95			4.205	2.805	0.24	0.36	14	14	0.02	0.05	0.00002	0.00005					
Prom. Periodo				0.23														
MJ (No-lineal)	15/05/93	0.50	2.00	1.59	1.8	0.63	0.56	11	6	0.11	0.05	0.0001	0.0000	0.0020	386	303		
	10/12/94			1.6	1.73	0.63	0.58	21	35	0.21	0.30	0.0001	0.0001					
	14/09/95			1.53	1.38	0.65	0.72	75	62	0.81	0.82	0.0004	0.0004					
	09/10/95			1.6	1.7	0.63	0.59	12	13	0.12	0.11	0.0001	0.0001					
Prom. Periodo				0.63														
IMS (Oficinas Centrales)	23/05/94	0.83	1.20	0.57	0.74	1.75	1.35	26	18	2.03	0.83	0.0003	0.0001	0.002	221	214		
	10/12/94			0.6	0.71	1.67	1.41	35	35	2.46	1.76	0.0004	0.0003					
	09/10/95			0.58	0.73	1.72	1.37	28	24	2.11	1.14	0.0004	0.0002					
Prom. Periodo				1.72		1.37												
IMS (Oficinas Centrales)	23/05/94	0.83	1.20	0.6	0.74	1.67	1.35	27	20	1.90	0.93	0.0003	0.0002	0.002	140	206.7		
	10/12/94			0.6	0.71	1.67	1.41	44	37	3.10	1.86	0.0005	0.0003					
	14/09/95			0.56	0.68	1.79	1.47	84	94	6.78	5.15	0.0012	0.0009					
	09/10/95			0.58	0.73	1.72	1.37	36	25	2.71	1.19	0.0005	0.0002					
Prom. Periodo				1.72		1.40												
PC (No-lineal)	31/05/90	0.45	2.22	0.4	0.39	2.50	2.56	35	39	5.54	6.49	0.0011	0.0013	0.0020	55	134		
	10/12/94			0.36	0.35	2.78	2.86	90	170	17.59	35.15	0.0034	0.0068					
	14/09/95			0.36	0.36	2.78	2.78	151	195	29.51	38.11	0.0057	0.0074					
	09/10/95			0.35	0.35	2.86	2.86	72	106	14.89	21.92	0.0029	0.0043					
Prom. Periodo				2.73														

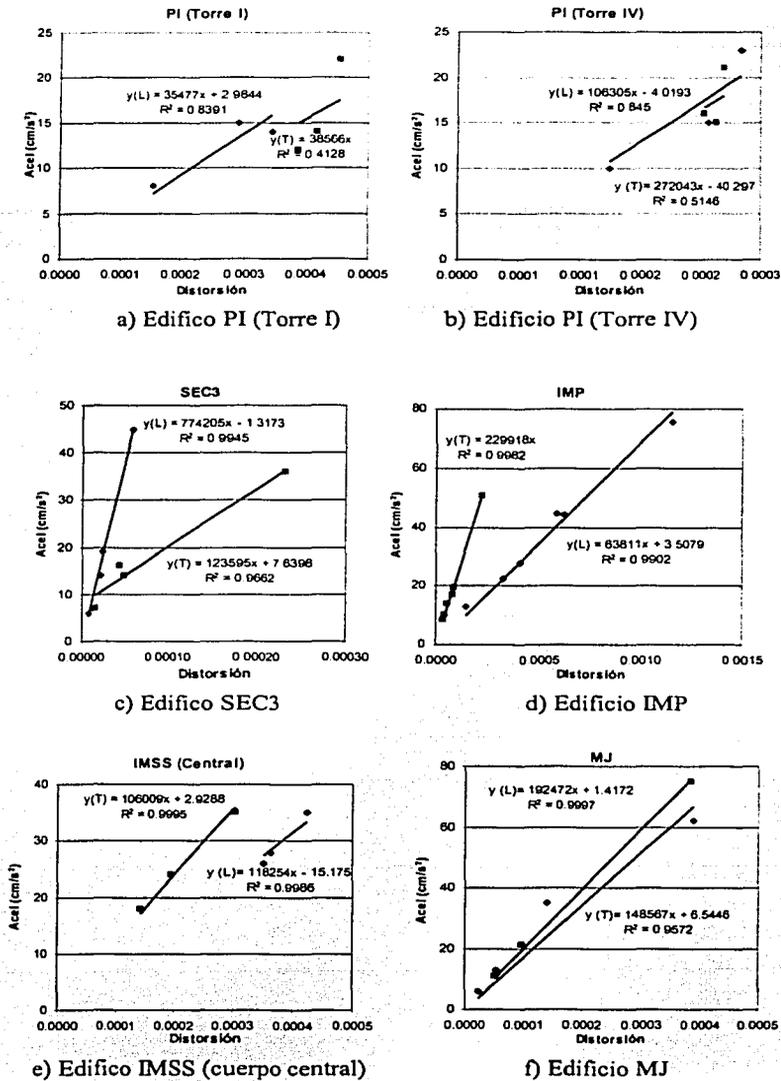


Figura 5.14 Correlaciones lineales para diferentes edificios

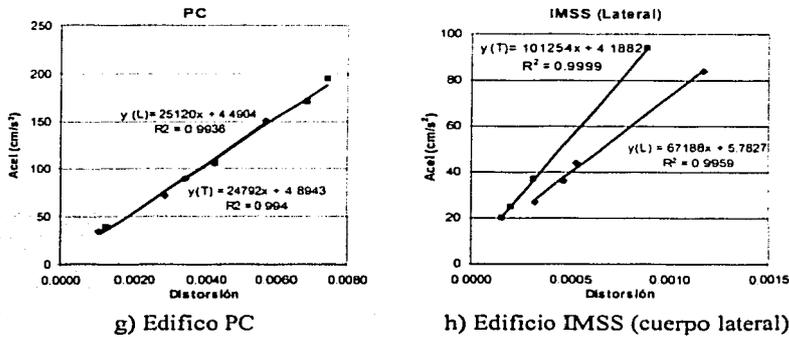


Figura 5.14 (Continuación)

En la figura 5.15 se muestra el espectro de respuesta de sitio para diferentes periodos de retorno. Estos sitios se eligieron porque se encuentran cercanos a los edificios instrumentados anteriormente presentados excepto el edificio IMP que cuenta con acelerografos de campo libre.

En la figura 5.15a se muestran espectros del sitio CU elegido para los cuerpos del edificio PI (torre IV) y PI (Torre I) donde se observa claramente cómo son los sismos de falla normal los que pueden llegar a generar las intensidades máximas. También se observa que para estos cuerpos del edificio PI se presenta la aceleración de servicio para periodos de retorno mucho mayores de 10 años.

En la figura 5.15b se observa en los espectros para el sitio IMP claramente como para periodos cercanos a 1 s, las intensidades sísmicas máximas se presentan debido a sismos de falla normal y de subducción. También se observa que el periodo de retorno es de aproximadamente de $T_R=10-20$ años para que se presente en este edificio (IMP) la aceleración que generaría la distorsión de servicio marcada por las NTCS-2002.

En la figura 5.15c y 5.15d se observa que para un periodo de retorno de $T_R \approx 125$ años es cuando se presenta la aceleración que provocaría una distorsión de servicio en los edificios MJ y SEC3.

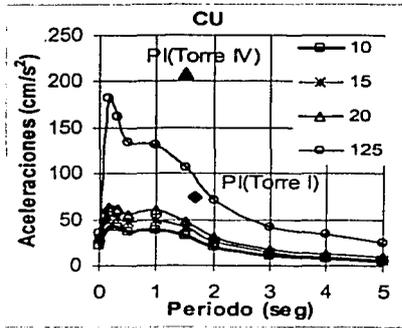
En la figura 5.15e se observa los espectros de respuesta para el sitio 45 escogido para el edificio PC n donde el periodo de retorno para que se presente la aceleración que provocaría la distorsión de servicio es ligeramente menor de 10 años.

Por último en la figura 5.15f se observan los espectros para el sitio 44 y las aceleraciones que provocarían las distorsiones de servicio a los cuerpos para el edificio IMSS (central y lateral). En esta figura se observa como las aceleraciones se encuentran en un intervalo de $T_R=10-20$ años.

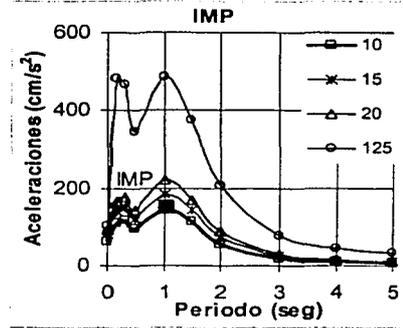
De esto se puede concluir que cada edificio presentado tiene su propio periodo de retorno de servicio al diseñar con el reglamento actual del DF. Es decir, que algunos edificios diseñados y construidos actualmente posiblemente cumplirían las distorsiones de servicio marcadas por las nuevas NTCS-2002 y otros no.

Pero también cabe hacer la siguiente reflexión, que el diseñador de acuerdo a lo que se propone en este trabajo y en las NTCS-2002 en algunas ocasiones regirá el estado límite de colapso y otras el estado

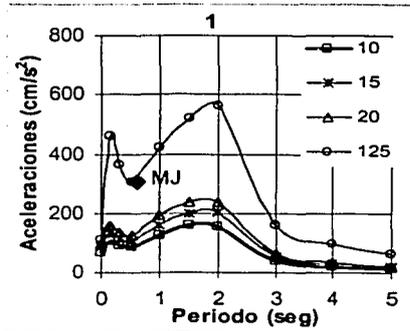
límite de servicio. Esto se puede razonar porque en las estructuras con un factor de comportamiento $Q=4$ generalmente las intensidades de los espectros utilizados para revisar límites de colapso podría resultar menor al espectro generado para revisar límites de servicio (periodo de retorno $T_R=10-20$ años). Es decir, que al momento de revisar distorsiones ante el estado de colapso las distorsiones que registrarán serán las que provienen del análisis bajo condiciones de servicio. Posiblemente hallan algunas estructuras que de acuerdo a esta nueva propuesta resultaran más "caras" pero con niveles mayores de confianza. Esto de "caras" está entre comillas porque en algunas ocasiones es más valioso el contenido que la misma estructura, además de tener mejores niveles de confianza que solamente esperar que no se colapse la estructura.



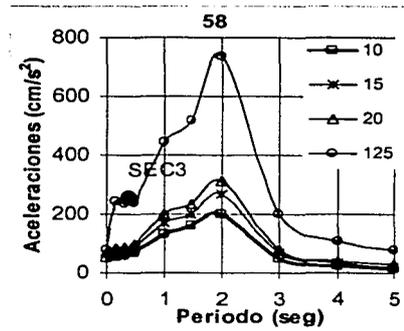
a) Estación CU



b) Estación IM

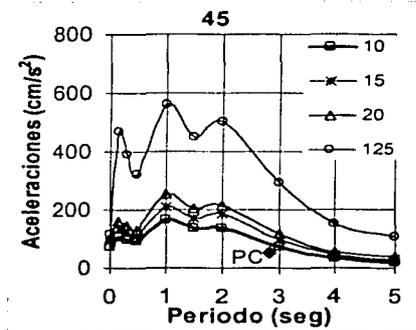


c) Estación 1

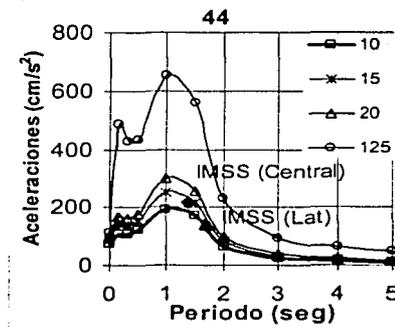


d) Estación 58

Figura 5.15 Espectros en varios sitios del valle de México para diferentes periodo de retorno



e) Estación 45



f) Estación 44

Figura 5.15 (continuación)

5.5 Mapas de igual aceleración para diferentes periodos de retorno

Con ayuda de los cocientes espectrales de respuesta obtenidos a partir de un simple promedio de terreno firme y 66 sitios del valle de México de la ciudad de México y mediante la expresión (4.6), se calcularon las curvas de igual aceleración para diferentes periodos de retorno y para diferentes periodos estructurales en la ciudad de México. En las figuras 5.16 a 5.17 se muestran en cada una de ellas seis gráficas que corresponden a periodos de 0.5, 1, 1.5, 2, 3 y 5 segundos calculadas tomando el valor mayor en cada periodo estructural.

a) Para un periodo de retorno de 10 años

Se muestra la figura 5.16 en donde se observan las curvas correspondientes a un periodo de $T_R=10$ años para siete niveles de amplificación, del tono más claro al más oscuro, de aceleración en terreno firme de 0 a 50, de 50 a 100, de 100 a 150, de 150 a 200, de 200 a 250, de 250 a 300 y mayor que 300 cm/s^2 . En esta figura se observan los niveles de aceleración que nos indican su variación y su distribución en el valle de México. También se muestran los puntos negros que corresponden a la ubicación de los edificios antes analizados, a un costado de estos se presenta la aceleración que se presenta en la Tabla 5.1 de cada uno de los edificios en la que esta aceleración representa un umbral para las distorsiones permisibles marcadas por el nuevo reglamento del DF. Todos estos edificios cumplirían con la distorsión permisible de servicio marcada en las NTCS-2002 porque no rebasarían las distorsiones de servicio establecidas en este. Inclusive el edificio PC que en la figura 5.15e se observaba que el periodo de retorno para que se presentara la aceleración de servicio debía ser menor de 10 años en esta figura resulta aceptable debido a la interpolación que se hace entre las diferentes estaciones.

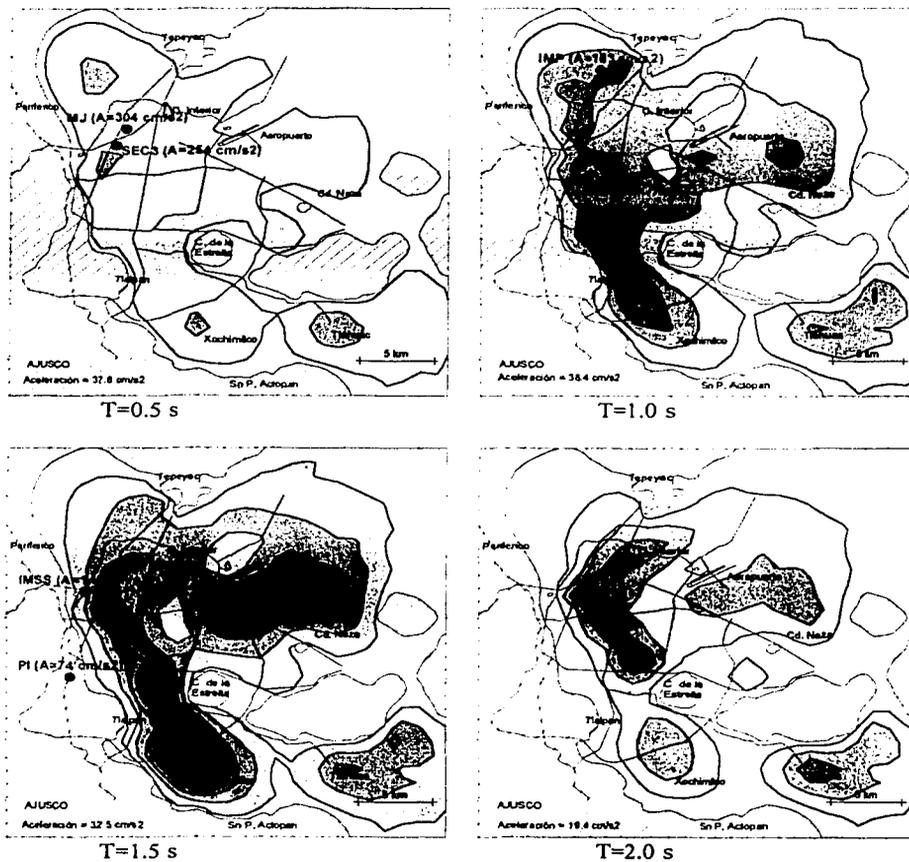


Figura 5.16 Curvas de igual periodo de isoaceleraciones (cm/s²) en la Ciudad de México para T_R= 10 años

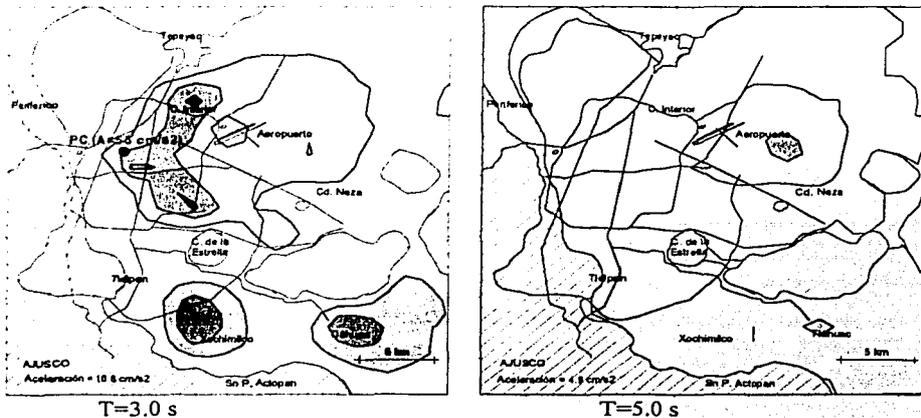


Figura 5.16 (Continuación)

b) Para un periodo de retorno de 20 años

En la figura 5.17 se muestran las curvas de igual aceleración para un periodo de retorno de $T_R=20$ años. Los niveles de aceleración corresponden a intervalos de terreno firme a 100, de 100 a 150, de 150 a 200, de 200 a 250, de 250 a 300, de 300 a 400, y mayor que 400 cm/s^2 . Se observa que para niveles bajos de aceleración estas curvas son muy similares a las de la figura 5.16.

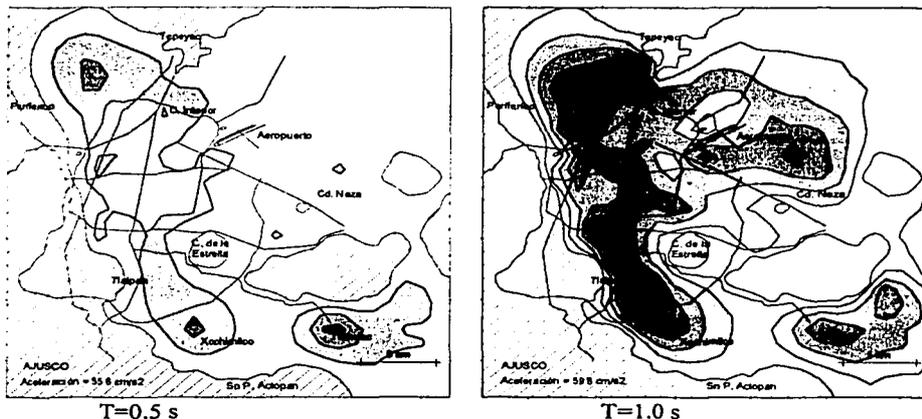


Figura 5.17 Curvas de igual periodo de isoaceleraciones (cm/s^2) en la Ciudad de México para $T_R=20$ años

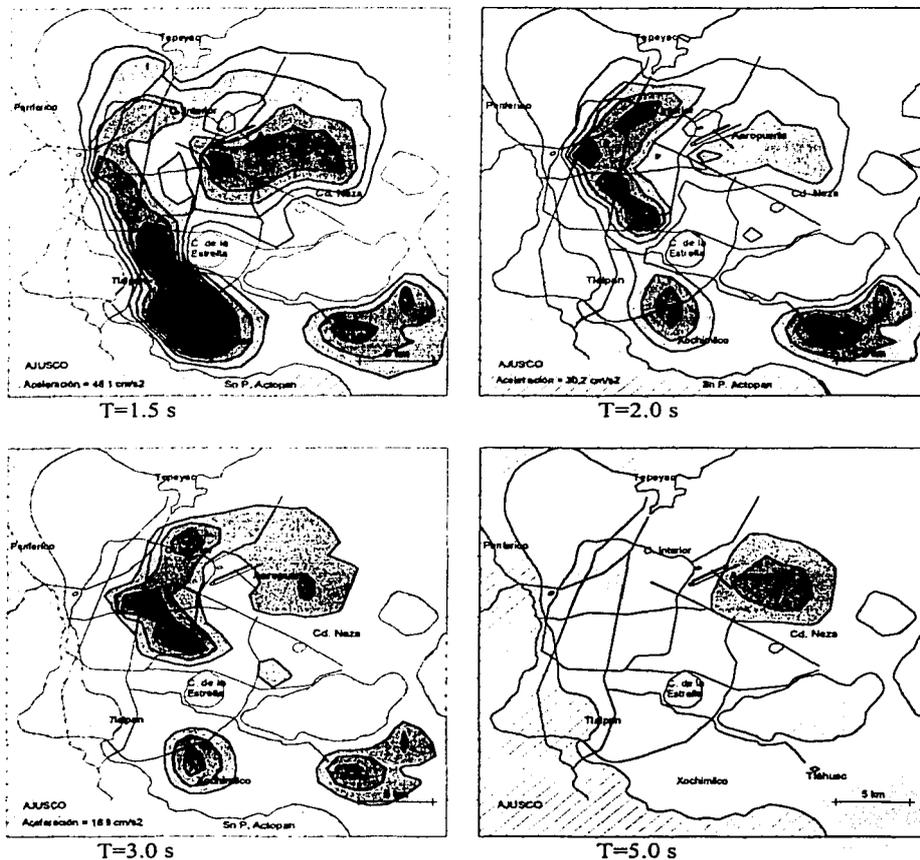


Figura 5.17 (Continuación)

c) Para un periodo de retorno de 125 años

En la figura 5.18 se observan las curvas que corresponden a seis niveles de amplificación, del tono más claro al más oscuro de terreno firme a 200, de 200 a 400, de 400 a 600, de 600 a 800, de 600 a 1000 y mayor que 1000 cm/s^2 . Estos niveles de aceleración son sólo para observar la variación de la aceleración y su distribución en el valle de México. También se muestran con líneas oscuras las zonas de daño del sismo de 19 de septiembre de 1985 donde las zonas con bordes rectos representan los límites de las zonas que presentaron daños y las otras zonas representan las zonas de mayor daño.

Las gráficas que corresponden a los periodos de 1.5 y 2 segundos son las que más se correlacionan con las zonas de daño de sismos pasados, aunque para las gráficas con periodo de 1.5 segundos la aceleración es baja. También en estas figura se observa que al sur del valle de México (Xochimilco y

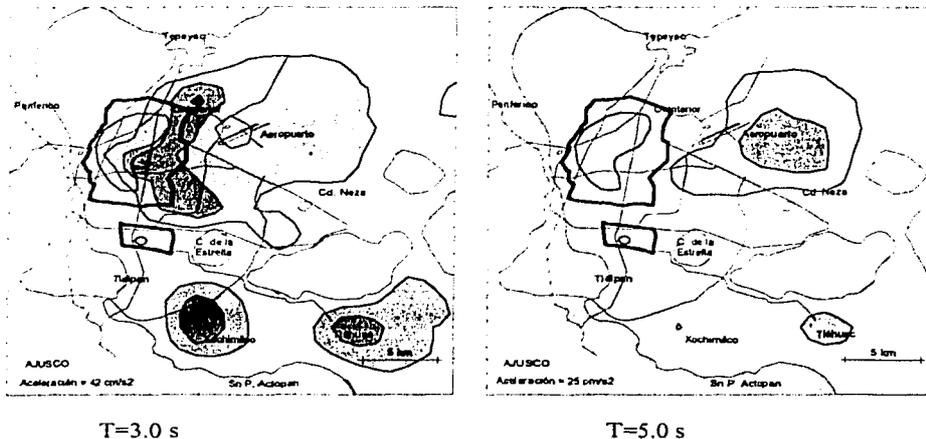


Figura 5.18 (Continuación)

5.6 Espectros de diseño propuestos para periodos de retorno menores de 20 años

Se presenta una propuesta de espectros de diseño para diferentes periodos de retorno menores de 20 años. Esto porque a lo largo de este último capítulo se ha observado que los periodos de retorno recomendables para considerar un sismo de servicio en sitio de lomas es de 20 años y en zona de lago y transición de 10 años.

En esta parte el desarrollo y la forma de proceder sigue el mismo criterio que se plantea en Ordaz *et al.* 2000. Debido que es una manera práctica de generar espectros de diseño elásticos para diferentes periodos de retorno. Se toma la forma paramétrica del espectro de aceleración, $Sa(T)$ que consiste en la expresión (5.4):

$$\frac{Sa(T)}{g} = \begin{cases} a_o + (c - a_o) \frac{T}{T_a} & \text{si } T < T_a \\ c & \text{si } T_a \leq T < T_b \\ c \left[k + (1 - k) \left(\frac{T_b}{T} \right)^2 \right] \left(\frac{T_b}{T} \right)^2 & \text{si } T \geq T_b \end{cases} \quad (5.4)$$

La forma de los espectros para diferentes periodos de retorno ($T_R=10, 15$ y 20) dependerá de estos 5 parámetros donde: a_o , que es la aceleración máxima del terreno para cada periodo de retorno (T_R); c , que es la ordenada espectral máxima para cada T_R ; T_a y T_b , que son periodos característicos del espectro se conservaran constantes para los diferentes T_R ; y k es un parámetro que controla la caída de la ordenada espectral para $T > T_b$ que de igual manera permanecerá constante para cada T_R .

A partir de esta forma espectral (ecuación 5.4), se procedió a determinar, para las 66 estaciones estudiadas en este trabajo, los valores de los dos parámetros a_0 y c que variarán para cada periodo de retorno. T_b y k se tomarán constantes tal y como son presentadas en la referencia mencionada. En la Tabla 5.2 y 5.3 se presentan las expresiones algebraicas calculadas para estos dos parámetros, así como los valores de T_a , T_b y k .

Tabla 5.2 Expresiones algebraicas que definen a_0 y c para diferentes periodos de retorno

T_R	a_0		c	
10	$0.04 + 0.1(T_s - 0.5)$;	si $0.5 \leq T_s \leq 1.0s$	$0.10 + 0.46(T_s - 0.5)$;	si $0.5 < T_s \leq 1.0s$
	0.09	; si $T_s > 1.0s$	0.33 ; si $1.0 < T_s \leq 2.0s$	
15	$0.04 + 0.14(T_s - 0.5)$;	si $0.5 \leq T_s \leq 1.0s$	$0.13 + 0.56(T_s - 0.5)$;	si $0.5 < T_s \leq 1.0s$
	0.11	; si $T_s > 1.0s$	0.41 ; si $1.0 < T_s \leq 2.0s$	
20	$0.05 + 0.16(T_s - 0.5)$;	si $0.5 \leq T_s \leq 1.0s$	$0.14 + 0.66(T_s - 0.5)$;	si $0.5 < T_s \leq 1.0s$
	0.13	; si $T_s > 1.0s$	0.47 ; si $1.0 < T_s \leq 2.0s$	
			$0.47 - 0.13(T_s - 2)$;	si $2.0 < T_s \leq 3.0s$
			0.22 ; si $3.0 < T_s \leq 5.0s$	
			0.28 ; si $3.0 < T_s \leq 5.0s$	
			0.34 ; si $3.0 < T_s \leq 5.0s$	

Tabla 5.3 Expresiones algebraicas que definen T_a , T_b y k

T_a	$0.20 + 0.65(T_s - 0.5)$;	si $0.5 < T_s \leq 2.50s$
	1.5	; si $2.5 < T_s \leq 3.25s$
	$4.75 - T_s$; si $3.25 < T_s \leq 3.9s$
	0.85	; si $T_s > 3.9s$
T_b	1.35	; si $T_s \leq 1.125s$
	$1.2T_s$; si $1.125 < T_s \leq 3.5s$
	4.20	; si $T_s > 3.5s$
k	$2 - T_s$; si $0.5 < T_s \leq 1.65s$
	0.35	; si $T_s > 1.65s$

En la figura 5.19 se presentan los valores calculados para los dos parámetros a_0 y c que están conservadoramente cubiertas por las líneas rectas generadas a partir de las expresiones de la Tabla 5.2 para diferentes periodos de retorno. Excepto para dos sitios del valle de México el parámetro a_0 no cumple. Estos sitios son el 35 y TB con $T_s=5$ s que se encuentran sur de la ciudad de México. También para las estaciones 36 ($T_s=3.5$) y ZA ($T_s=4.3$) el parámetro c está por debajo de las expresiones propuestas.

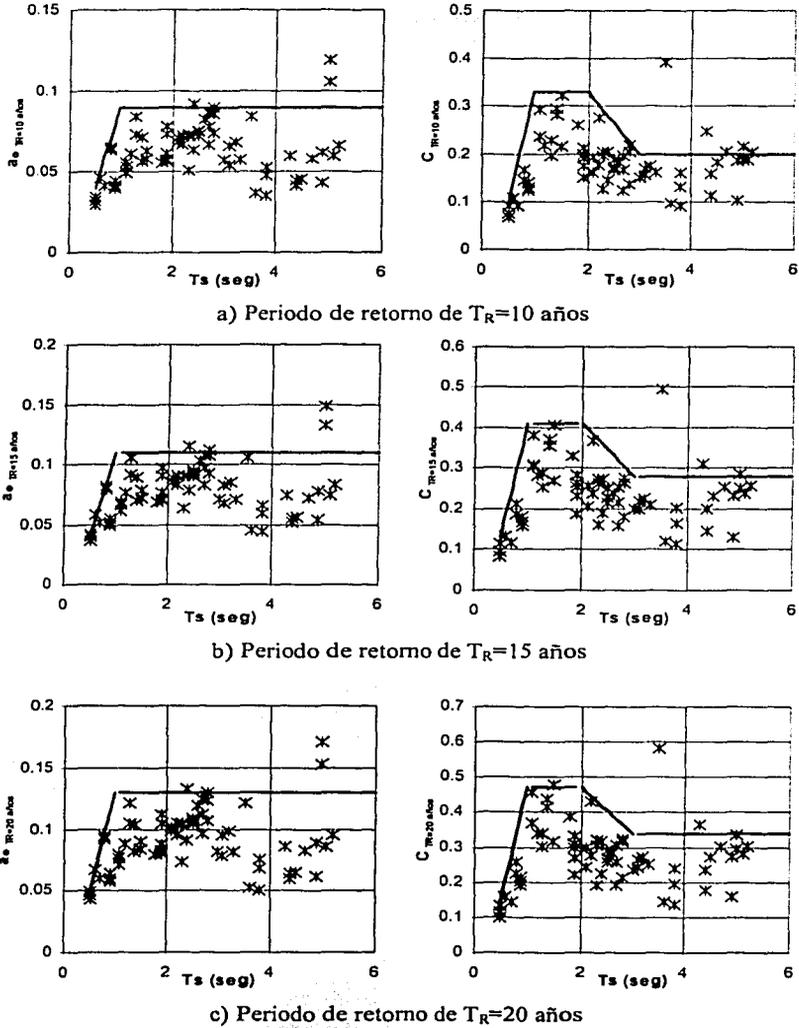


Figura 5.19 Parametros de a_0 y c para diferentes periodos de retorno

En la figura 5.20 se presenta un resumen de los parámetros a_0 y c para diferentes periodos de retorno incluyendo el obtenido por Ordaz *et al.* (2000) para un periodo de retorno de 125 años.

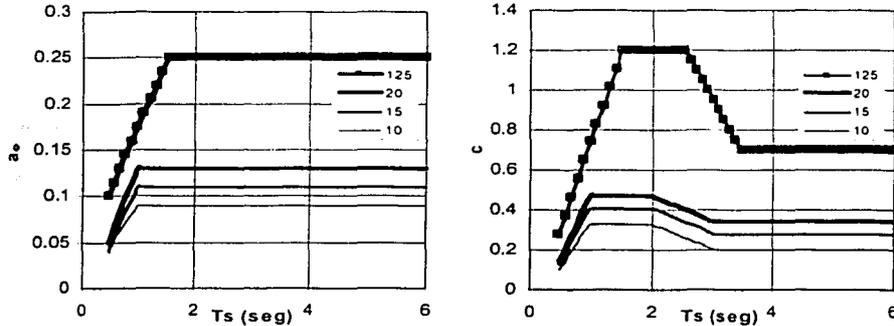


Figura 5.20 Parametros de a_0 y c para diferentes periodos de retorno

En la figura 5.21 se presentan los espectros para cuatro estaciones: 58, CD, SCT y 54. La nomenclatura usada para representar estos espectros es la siguiente *Elas(NTCS)* es el espectro de las NTCS-2002, *Serv(NTCS)* es el espectro obtenido de las NTCS-2002 al dividir el espectro elástico entre 7, *Propuesto* es el obtenido en este trabajo de las expresiones marcadas en las Tablas 5.2 y 5.3 para un periodo de retorno de 10 años, *Calc-10* y *Calc-125* es el espectro producto de la función de amplificación con una desviación estandar de cada sitio por el espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 10 y 125 años respectivamente.

En esta figura se observa que para las estaciones 58, SCT y CD el espectro de diseño elástico establecido en las NTCS-2002 abarca para todos los periodos estructurales, las intensidades máximas generadas por el espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 125 años. Sin embargo para las estaciones 54 el espectro elástico de diseño de las NTCS-2002 no abarca las intensidades generadas por el espectro de peligro uniforme de 125 años principalmente en el periodo de suelo del sitio.

También en esta figura se observa que el espectro de servicio propuesto por las NTCS-2002 para las estaciones 58 y SCT abarca las intensidades generadas por un espectro de peligro uniforme con un $T_R=10$ años de manera adecuada cosa que no sucede con las estaciones CD y 54. En cambio con las expresiones que se proponen en la Tabla 5.2 y 5.3 de este trabajo se abarca todas las intensidades para un periodo de retorno de 10 años generadas por sismos de subducción y falla normal.

Finalmente, se observa que los parámetros T_a y T_b , donde los límites dados por las expresiones de la Tabla 5.3 se pueden mejorar, probablemente reduciendo estos parámetros. Por otro lado, para el parametro k no se observa algo que indique que este debe cambiar.

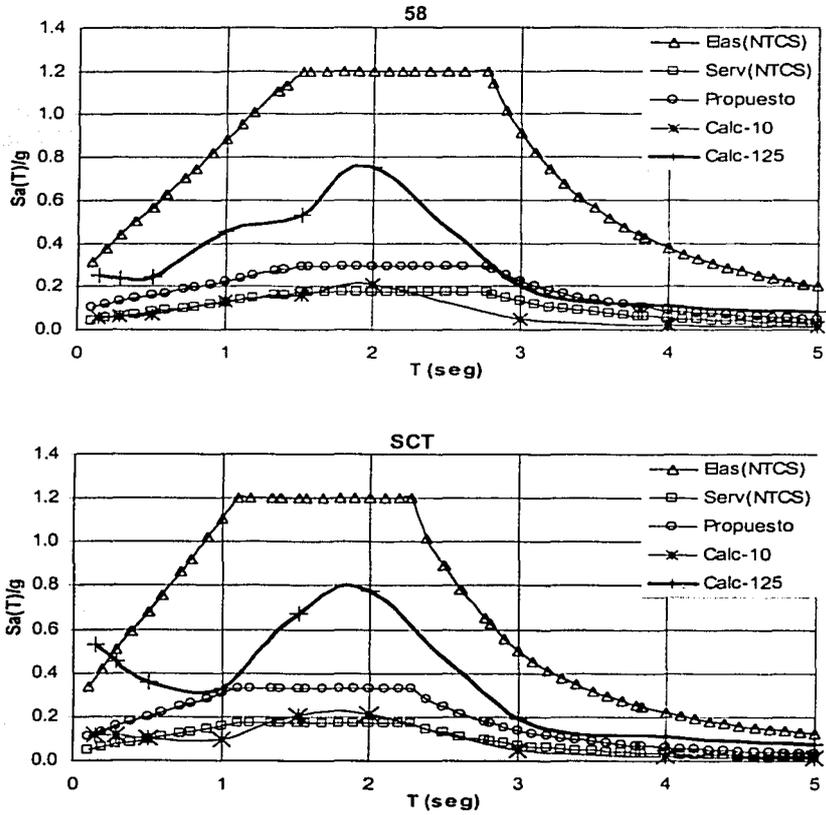


Figura 5.21 Espectros para diferentes estaciones del valle de México

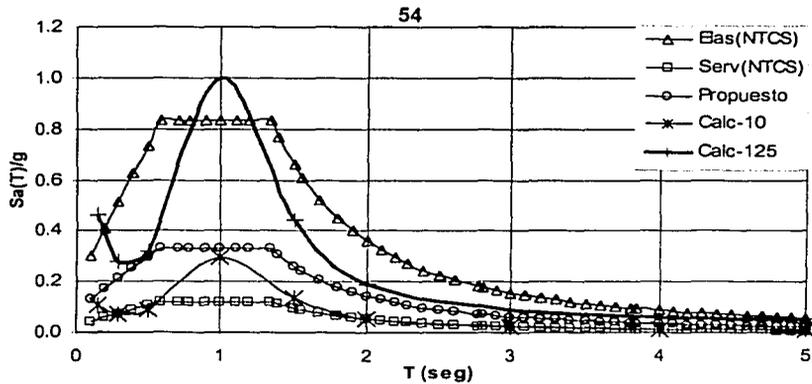
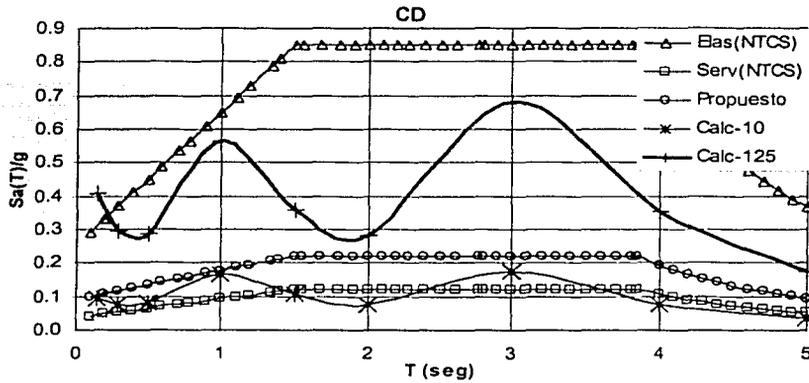


Figura 5.21 (Continuación)

CONCLUSIONES

En esta parte se hace un resumen general de las principales conclusiones que se obtuvieron a lo largo de este trabajo.

Capítulo 1

Se realizó una clasificación de los eventos sísmicos que se pueden considerar como sismos de falla normal e intraplaca y que han provocado daños en lugares del país donde durante el siglo XX no ha temblado. Se denotó la importancia que estos sismos tienen debido a que han provocado a lo largo de su historia daños y pérdidas en la ciudad de México; como derrumbamientos en los cerros y que en las iglesias, templos y estructuras con bajo periodo estructural sean las que en gran parte han sufrido los mayores daños ante este tipo de eventos sísmicos.

Capítulo 2

En esta segunda parte observamos características de movimientos fuertes en zona de lomas de la Ciudad de México, considerando el tipo de brecha sísmica a la que pertenece el evento sísmico. En este se observó claramente que la variación del contenido de frecuencias cuando se presenta la amplitud máxima depende de la magnitud del sismo, y de la brecha sísmica donde se originó el evento sísmico. Por otro lado se observó la diferencia del contenido de frecuencias entre los sismos de falla normal y de subducción. Donde las amplitudes mayores se presentan para frecuencias altas para sismos de falla normal y para sismos de subducción las máximas amplitudes se presentan para frecuencias bajas.

Capítulo 3

Los efectos en la ciudad de México debido a los sismos de subducción son muy distintos a los efectos de los sismos de falla normal, pero los patrones de amplificación de la zona de lago no difieren sustancialmente. La principal diferencia en el movimiento estará dada por las diferencias en magnitud y distancia epicentral, pero no en los efectos de sitio. Podemos esperar que los sismos de subducción seguirán siendo los que más afecten a la ciudad. Sin embargo, es posible que algún sismo de otra fuente pueda provocar sollicitaciones grandes en las zonas de lomas y transición, donde históricamente los sismos de subducción no han causado daños. Se considera que el uso de cocientes espectrales de respuesta (CER) considerando el promedio de las estaciones de lomas SE (Sitios 13, 34, 40, 50, 74, 78,

CU, CH y TY) y una desviación estándar para la estimación del espectro de respuesta en diferentes sitios de Ciudad de México es aceptable (Arciniega *et al.* 1993).

Las curvas de igual amplificación para el valle de México para los diferentes eventos son similares, con diferencias para algunas estaciones. Para estas curvas existe más amplificación en sitios que históricamente han mostrado ser los más afectados durante sismos de subducción. Estas gráficas tienen una gran correlación con el daño ocurrido en el valle de México durante el sismo de septiembre de 1985, siendo la gráfica de 2 segundos la que tiene más coincidencia de alta amplificación con las zonas de daños de este sismo. Las curvas obtenidas para los diferentes tipos de sismos para un periodo de 2 segundos muestran que las zonas en que se presenta la amplificación máxima son recurrentes, y la poca variación puede ser atribuida a las diferencias en magnitud, distancia al área epicentral, y en menor escala a características del sismo. Se observa que los niveles de amplificación no están correlacionados con el periodo del suelo y que la estación SCT no tiene las mayores ordenadas de amplificación para estos eventos estudiados.

Capítulo 4

Se mostraron diferentes escenarios de riesgo ante un sismo de subducción y tres de falla normal para diferentes caídas de esfuerzo y momento sísmico pero con una aceleración máxima del suelo constante en el sitio CU asociada a un periodo de retorno de 125 años. Se concluye con esto que es posible que algún sismo de falla normal pueda provocar solicitaciones grandes en las zonas de lomas y transición, y en algunas estructuras desplantadas en sitios con periodos menores de 1.5 segundos, donde históricamente los sismos de subducción no han causado daños.

Así mismo se mostró que existe una gran incertidumbre en la caída de esfuerzo. El establecer una relación entre caída de esfuerzo y magnitud no ha sido posible hoy en día debido a la gran incertidumbre que presentan. Además que existe una gran diferencia entre la caída de esfuerzos de un sismo de falla normal y de subducción por lo que se requiere continuar investigando sobre este tema para una mejor predicción de escenarios que puedan ocurrir en un futuro.

Capítulo 5

En la estimación del espectro de respuesta en CU calculado con el programa Crisis 2000 se observa una diferencia importante con el presentado en Reyes (2002), principalmente para periodos de 0.01-2 s. Esta diferencia se debe a que el calculado con el programa Crisis 2000 considera no solamente los sismos de subducción sino también los de falla normal.

Las curvas teóricas de peligro sísmico en la estación CU obtenidas del programa Crisis 2000 se comparan con las que se obtienen de los datos registrados en la misma estación, obteniéndose una gran congruencia entre ambas para estimar espectros de aceleraciones en CU para periodos de retorno menores de 40 años.

Se construyen espectros de peligro uniforme en la estación CU y en las estaciones localizadas en suelo blando. En las estaciones de suelo blando, los espectros de peligro uniforme se construyen mediante el uso de los CER (con una desviación estándar). Se pudo observar, como en Reyes (2002), que existen

estaciones de registro sísmico que presentan amplificaciones superiores de movimiento del terreno en comparación con la estación SCT (Estación que registro el movimiento más intenso durante el sismo de 1985).

Se obtuvieron escenarios de riesgo sísmico para diferentes periodos de retorno ($T_R=10, 20$ y 125 años) y periodos estructurales. Con este tipo de mapas se identifican zonas de riesgo en la ciudad de México para construcciones nuevas como es el caso de Xochimilco y Tláhuac.

Por último, se obtuvieron expresiones algebraicas para calcular los parámetros a_0 y c . Con estos parámetros se pueden obtener espectros de diseño para diferentes periodos de retorno ($T_R=10, 15$ y 20 años). Estas expresiones dan una aproximación aceptable con los teóricos calculados.

REFERENCIAS

Arciniega, A., M. Ordaz, Padilla G., Pérez Rocha L. E. y Rosenblueth E. (1993), "Predicción de espectros de respuesta en el valle de México. Métodos simplificados y aplicaciones," Reporte FJBS/CIS-93/04, Centro de Investigación Sísmica A. C., Fundación Javier Barros Sierra.

García V. A. Y Suárez G. R. (1996). "Los sismos en la historia de México, Ediciones científicas universitarias," tomo I.

Gere J. M., Shaj H. (1984), "Terra Non Firma," W. H. Freeman and Co., New York, 203 pp.

Humphrey, J.R., Jr y Anderson, J. G. (1994). "Seismic Source Parameters from the Guerrero Subduction Zone," Bull. Seism. Soc. Am., 84, No. 6, 1754-1769.

Iglesias, A., Singh, S. K., Pacheco, J. F. y Ordaz, M. (2002). "A Source and Wave Propagation Study of the Copalillo, Mexico Earthquake of July, 2000 (Mw=5.9): Implications for Seismic Hazard in Mexico City from Inslab earthquakes," aceptado para publicarse en Bull. Seism. Soc. Am.

Lam N., Wilson J., Hutchinson G. (1996), "Building Ductility Demand: Interplate Versus Intraplate Earthquakes," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol. 25, 965-985.

NTCS-2002 (2002). "Propuesta de normas técnicas complementarias para diseño por sismo", <http://www.smie.or.mx/articulos>, abril.

Ordaz, M. y Reinoso, E. (1987), "Uso de la teoría de vibraciones aleatorias en la determinación de los espectros de diseño del reglamento para las construcciones del Distrito federal," Memorias del VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Querétaro Qro., México, pp. A155-A167.

Ordaz M., Singh S. K. (1992), "Source spectra and spectral attenuation of seismic waves from Mexican earthquakes, and evidence of amplification on the hill zone of Mexico City," Bull. Seism. Soc. Am., 82, 24-43.

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, No. 6, 1635-1647.

- Ordaz, M. y Reyes, C.** (1999), "Earthquake Hazard in Mexico City: observations versus computations," *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 89, No. 5, pp. 1379-1383.
- Ordaz M., Miranda E. y Avilés J.** (2000), "Propuesta de espectros de diseño para el DF"
- Ordaz, M.** (2002). Comunicación personal.
- Pacheco, J. F. y Singh S. K.** (1995). "Estimation of Ground Motions in the Valley of Mexico from Normal-Faulting, Intermediate-Depth Earthquakes in the Subducted Cocos Plate," *Earthquake Spectra* 11, No. 2, 233-247
- Pardo, M. y Suárez, G.** (1995). "Sismotectónica del sur de México: Subducción de las placas de Rivera y Cocos bajo la placa norteamericana," *La sismología en México: 10 años después del temblor de Michoacán del 19 de Septiembre de 1985 (M=8.1)*, Monografía No. 2 Unión Geofísica Mexicana, 165-180.
- Pérez, L., Ordaz, M. y Reinoso, E.** (1997), "Escenarios de alto riesgo sísmico en la ciudad de México," *Memorias del X Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Veracruz Ver., México*, pp. 279-289.
- Pérez R. L., Sánchez S. F., Ordaz M., Singh S. K. y Reinoso E.** (2000), "Strong ground prediction at México City," *Memorias, twelveth World Conference on Earthquake Engineering*.
- Reinoso E. y Ordaz, M.** (1999). "Spectral Ratios for Mexico City from Free-Field Recordings," *Earthquake Spectra*, 15, No. 2, 273-295.
- Reinoso E., Flores., Ordaz M., Sánchez F.** (1996), "Investigación de la Amplificación Sísmica en el Valle de México con Base en registros de la red Acelerográfica," *Centro de Investigación Sísmico*, diciembre.
- Reyes, C.** (1999), "El estado límite de servicio en el diseño sísmico de edificios." Tesis Doctoral, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.
- Reyes, C., Miranda E., Ordaz M. y Meli R.** (2002), "Estimación de espectros de aceleraciones correspondientes a diferentes periodos de retorno para las distintas zonas sísmicas de la Ciudad de México," *Revista de Ingeniería Sísmica*, Vol. 66, pp. 95-121.
- Rosenblueth, E. y Arciniega, A.** (1992), "Response spectral ratios," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 21, pp. 483-492.
- Singh S.K. y Suárez G.** "Review of the seismicity of Mexico with emphasis on the September 1985, Michoacan Earthquakes," 7-18.

- Singh, S. K., Ordaz, M., Anderson, J. G., Rodriguez, M. y Quaas R. (1995). "Analysis of near-source strong-motion recordings along the mexican subduction zone," Bull. Seism. Soc. Am., 79, No. 6, 1697-1717.
- Singh, S. K., Ordaz, M. y Pérez, R. (1996). "The Great Mexican Earthquake of 19 June 1958: Expected Ground Motions and Damage in Mexico City from a Similar Future Event," Bull. Seism. Soc. Am., 86, No. 6, 1655-1666.
- Singh, S. K., Ordaz, M., Pacheco, J. F., Quaas, R., Alcantára, L., Alcocer, S., Gutierrez, C., Meli, R. y Ovando, E. (1999). "A Preliminary Report in the Tehuacán, México Earthquake of June 15, 1999 (Mw=7.0)," Sismological Reserach Letters, 70, No. 5, 489-504.
- Tena C. A. /Compilador. (1997), "El Macrosismo de Manzanillo del 9 de octubre de 1995," Memorias del Simposio del 9 de octubre de 1997, Colima Col., México, pp. 197-232.
- Torres, L. J. J. (1997), "Incertidumbres en la estimación de la frecuencia natural de vibrar en edificios," Tesis de Maestría, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.
- Valdés, G. J. y Ramírez, H. (1995). "Generación de acelerogramas sintéticos para la ciudad de Toluca que resultarían de la ocurrencia de un temblor hipotético de magnitud 8.3 en la brecha de Guerrero," Revista de Ingeniería Sísmica, 51, 13-24.
- Yamamoto, J., Quintaner, L., Rebollar, C. y Jiménez Z. (2002). "Source Characteristics and Propagation Effects of the Puebla, Mexico Earthquake of June 15, 1999," aceptado para publicarse en Bull. Seism. Soc. Am.