

Metodología para la estimación del peligro sísmico con base en la teoría de vibraciones aleatorias

Jesús Valdés González*

Recepción: 12 de junio de 2007
Aceptación: 25 de octubre de 2007

* Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México.
Correo electrónico: jvaldes@uaemex.mx

Resumen. Se pretende mostrar la metodología a seguir para estimar el peligro sísmico en un sitio que cuenta con escasa información al respecto. Para ello se formulan y aplican dos planteamientos deterministas diferentes (teoría de vibraciones aleatorias y simulación de acelerogramas usando registros pequeños como funciones de Green empíricas) por medio de los cuales es posible estimar el peligro sísmico que enfrenta el sitio que se estudia. En particular se analiza el caso de la ciudad de Toluca y se estudian dos grandes temblores, el primero corresponde al temblor del 19 de septiembre de 1985 ($M_s = 8.1$) cuya intensidad se considera la máxima registrada en dicha ciudad, el segundo evento se refiere a un temblor hipotético de magnitud $M_s = 8.3$ en la brecha de Guerrero. Adicionalmente se analizan otros dos tipos de temblores (falla normal y Acambay) que pudiesen afectar el sitio en estudio. El peligro sísmico se valora en términos de los espectros de respuesta elásticos de los sismos analizados.

Palabras clave: peligro sísmico, vibraciones aleatorias, simulación, acelerogramas y espectros de respuesta.

Methodology for Estimating the Seismic Hazard Using Random Vibration Theory

Abstract. We show the methodology for estimating the seismic hazard in a specific site that has scarce information respect to earthquakes. Two different deterministic procedures (random vibrations theory and simulation of accelerograms using records of small earthquakes as empirical Green's functions) are exposed to estimate the seismic hazard in the studied site. The Toluca city case is analyzed considering two big earthquakes, the first one occurred on September 19th 1985 ($M_s = 8.1$), whose intensity is the highest ever registered. The second one is a hypothetical $M_s = 8.3$ earthquake that might occur in the Guerrero gap. Also, two more earthquakes which could affect the studied site are analyzed (normal slip and Acambay). The seismic hazard is evaluated in terms of the elastic response spectra coming from the studied earthquakes.

Key words: Seismic hazard, random vibrations, simulation, accelerograms and response spectra.

Introducción

El diseño sismorresistente de una estructura (edificio, puente, presa, etc.) requiere del conocimiento de distintos aspectos relacionados con la estructura y la sismicidad del sitio en estudio. Respecto a la sismicidad del lugar, interesan tres aspectos: a) la identificación de fuentes potenciales de temblores cuya ocurrencia pueda afectar el sitio donde se ubica

la estructura. Es importante considerar aspectos que van desde los periodos de recurrencia con que se generan sismos de cierta magnitud, hasta las características del mecanismo de ruptura en lo que respecta a la forma de radiación de la energía en distintos tipos de ondas (Sánchez-Sesma, 1982); b) los efectos de trayecto que comprenden el estudio de las trayectorias que siguen las ondas sísmicas desde el foco del temblor hasta el sitio donde se encuentra la estructura, así

como el efecto que las distintas formaciones geológicas por las que atraviesan producen (amplificación y atenuación de las ondas); c) los efectos de sitio, los cuales tienen que ver con el estudio del movimiento del terreno considerando las condiciones de topografía y estratigrafía propias del sitio donde se encuentra la estructura.

El diseño sismorresistente de las estructuras se plantea en términos del riesgo al que se considere deban estar sometidas. La gran incertidumbre en los distintos modelos utilizados obliga a que éste se valore de manera deseable en términos probabilistas. El riesgo se define como el producto de tres variables: el costo del bien expuesto (C); la vulnerabilidad del mismo ante la ocurrencia de un determinado evento sísmico (V) y el peligro que prevalece en el sitio donde se ubique el bien (P).

La vulnerabilidad de una estructura tiene que ver con su comportamiento ante la acción del movimiento del terreno cuando ocurre un sismo, y esto va a depender del diseño y detallado de la estructura; por tanto, es función de las características del sistema estructural. El peligro sísmico es propio de la región donde se analiza el riesgo y se cuantifica en términos de las distintas intensidades que un sismo con cierta probabilidad de ocurrencia generaría en dicha zona. La intensidad se refiere al conjunto de parámetros que caracterizan el movimiento del terreno en términos de los cuales se puede predecir la respuesta de un sistema estructural (Esteva, 1976), como podría ser la aceleración máxima del terreno o algún otro parámetro de este tipo.

En el contexto de este trabajo se dirá que evaluar el peligro sísmico significa cuantificar en términos de intensidad los eventos máximos creíbles para el diseño de las estructuras expuestas a ellos. La intensidad de un sismo en una estructura determinada se puede evaluar con base en el coeficiente sísmico ($c = F/W$), el cual relaciona el peso de la estructura (W) con la fuerza cortante máxima en su base que debe resistir (F).

El principal objetivo de este trabajo es mostrar la metodología para estimar los espectros de respuesta elástica (coeficientes sísmicos) correspondientes a diferentes temblores considerados los máximos creíbles para diseño, en sitios donde la información sísmica es escasa. El término *espectro de respuesta* se refiere a la relación que se establece entre la máxima demanda expresada en términos del coeficiente sísmico c , que durante la ocurrencia de un temblor en particular se presenta en una estructura con características dinámicas propias, respecto a su periodo natural de vibrar.

La acción de diseño debe corresponder a la intensidad asociada a un determinado periodo de retorno, el cual se obtiene mediante un procedimiento de optimación que tome

en cuenta el costo de hacer más resistente a la estructura y las consecuencias de su posible falla (Newmark y Rosenbluth, 1976; Esteva, 1980 y Meli, 1993). Una representación completa y rigurosa del peligro sísmico en un sitio determinado debe especificar la tasa de excedencia de las intensidades de los temblores que afectarán a ese sitio en el futuro. En los casos en que no se dispone de los suficientes datos para calcular estas tasas, suele describirse el peligro sísmico de manera determinista.

El criterio determinista se basa en la cuantificación del evento más desfavorable que razonablemente se considera pueda ocurrir. El estudio que se presenta adopta este criterio, para lo cual se estudian dos grandes temblores, el primero de ellos corresponde al del 19 de septiembre de 1985 ($M_s = 8.1$) cuya intensidad se considera la mayor que se ha registrado en la ciudad de Toluca. El segundo evento se refiere a un temblor hipotético de magnitud $M_s = 8.3$ en la brecha de Guerrero. Adicionalmente, se analizan otros dos tipos de temblores (de falla normal y Acambay), los cuales fueron considerados para la elaboración del actual Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (Reinoso *et al.*, 1994); y que debido a la cercanía entre ambas ciudades se espera que también afecten en forma importante a Toluca.

1. Antecedentes

El peligro sísmico en el valle de México está determinado por tres tipos de temblores (Ordaz *et al.*, 1995). El primero y más importante se refiere a los sismos que se originan en la costa del Pacífico debido a la subducción de las placas de Cocos y Rivera debajo de la de Norteamérica. En esta zona se han producido los dos terremotos más grandes que han ocurrido en México; el de Jalisco del 3 de junio de 1932 ($M = 8.2$), y el de Michoacán del 19 de septiembre de 1985 ($M = 8.1$). Se calcula que 85% de la energía sísmica que se genera en México corresponde a los temblores de subducción (Lomnitz, 1994).

Los otros dos tipos de temblores corresponden tanto a los sismos que ocurren en el continente a profundidades cercanas a 60 km (Oaxaca 1931, $M = 7.8$; Orizaba 1973; $M = 7.3$, Huajuapán de León 1980, $M = 7.0$ y Tehuacán 1999, $M = 7.0$); como los que se generan dentro de la placa continental ($M < 7$), los cuales suelen ocasionar fuertes daños en la zona cercana al epicentro (Jalapa 1920, $M = 6.4$ y Acambay 1912, $M = 7.0$).

Dadas estas condiciones, se espera que para un importante número de estructuras en el valle de México sea un evento de subducción el que contribuya en forma excepcional a determinar su máxima respuesta. Sin embargo, existe la

posibilidad de que se generen sismos dentro de la placa continental como el de Acambay en 1912, los cuales debido a su cercanía con el valle de México pudiesen afectarlo en la misma proporción que los grandes temblores de subducción ($M > 8.0$) generados a distancias epicentrales mayores ($R > 300$ km). En el presente trabajo se consideran y estudian ambos tipos de temblores (subducción y temblores generados dentro de la placa continental).

El caso de la ciudad de Toluca se considera representativo de muchas ciudades que a pesar de su importancia carecen de una red de instrumentación sísmica que genere suficiente información para estimar en forma confiable y bajo un enfoque probabilista, el peligro sísmico que enfrentan. En Toluca sólo han podido registrarse en forma instrumentada algunos temblores de magnitud moderada que no han ocasionado movimientos fuertes del terreno. Por ello, resulta de interés práctico desarrollar planteamientos alternos que utilicen la escasa información que se tiene y permitan estimar el movimiento del terreno en Toluca ante la ocurrencia de temblores intensos, aun cuando éstos se formulen en una primera instancia, bajo un enfoque determinista.

Al respecto se han realizado algunos estudios, por ejemplo, se generaron acelerogramas sintéticos a partir de los cuales se han podido valorar las características del movimiento del suelo en Toluca ante la ocurrencia de un temblor hipotético de magnitud $M_s = 8.3$ en la brecha de Guerrero (Valdés y Ramírez, 1995). También se han hecho algunos estudios de peligro sísmico basados en leyes generales de atenuación (Romero, 1991 y Delgado y Mendoza, 1997). Además de otros trabajos en los que se ha tratado de inferir la intensidad de los sismos de septiembre de 1985 a partir de la estimación de la capacidad sísmica de los edificios que resultaron afectados (Ramírez *et al.*, 1993).

2. Teoría de vibraciones aleatorias

Si se analiza un registro acelerográfico (acelerograma) $a_s(t)$, en el dominio de la frecuencia, resulta que a éste en particular le corresponde sólo un espectro de amplitudes de Fourier, pero a su vez, a un mismo espectro de amplitudes de Fourier le corresponden varios acelerogramas, los cuales se diferencian únicamente por el espectro de fase. Bajo los criterios usuales de diseño (espectros de respuesta elástica), resulta de interés conocer los valores máximos de la respuesta (positivos y negativos), y dichos valores se pueden estimar a partir del espectro de amplitudes de Fourier, el cual se asocia a distintos acelerogramas de un mismo tipo, que a su vez se pueden considerar como múltiples realizaciones de un mismo evento estocástico.

El teorema de Parseval establece que:

$$a_s^2 = \frac{1}{D_s} \int_0^{D_s} a_s^2(t) dt = \frac{1}{D_s} \int_{-\infty}^{\infty} |a_s(\omega)|^2 d\omega, \quad (1)$$

donde a_s^2 es la aceleración cuadrática media, $a_s(t)$ es la aceleración en el instante de tiempo t , $|a_s(\omega)|$ es la amplitud de Fourier correspondiente a la frecuencia ω y D_s es la duración de la fase intensa del registro.

De esta forma es posible obtener el valor de la aceleración cuadrática media en el dominio del tiempo a partir del espectro de amplitudes de Fourier que se conoce. Al ser $a_s(t)$ un proceso estocástico con media cero, la aceleración cuadrática media corresponde a la varianza de la aceleración, por lo que este parámetro permite establecer el grado de dispersión que se tiene. De acuerdo con la teoría de vibraciones aleatorias la cual considera a $a_s(t)$ como un proceso estocástico, estacionario de tipo gaussiano con media cero, el valor máximo esperado de $a_s(t)$ se puede obtener de la siguiente forma:

$$E(x_{s_{\max}}) = E(\eta_{\max}, N) x_s^2 \quad (2)$$

donde x_s^2 es la varianza de la aceleración y $E(\eta_{\max}, N)$ el denominado factor pico, el cual se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$E(\eta_{\max}, N) = \sqrt{2 \ln N} + \frac{\gamma}{\sqrt{2 \ln N}}, \quad (3)$$

donde $\gamma = 0.577$ es la constante de Euler y N es el número de puntos máximos y mínimos de la señal en el dominio del tiempo.

A su vez, N se calcula de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$N = f D_s \quad (4)$$

donde:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{m_2}{m_0}\right)} \quad (5)$$

y

$$m_k = \frac{1}{D_s} \int_{-\infty}^{\infty} \omega^k |a_s(\omega)|^2 d\omega \quad (6)$$

El principal objetivo es estimar la respuesta de un oscilador de un grado de libertad sometido a una excitación cuyo

espectro de amplitudes de Fourier se conoce. Para hacer esto basta con multiplicar el espectro de amplitudes de la excitación $|a_s(\omega)|$ por la amplitud de la función de transferencia, la cual depende únicamente de las características dinámicas del oscilador que se analiza. La función de transferencia se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$H_T(\omega) = \frac{(\Omega^2 - \omega^2) - 2\xi\omega\Omega i}{(\Omega^2 - \omega^2)^2 + (2\xi\omega\Omega)^2} \quad (7)$$

donde $\Omega = 2\pi/T$, T es el periodo de vibración traslacional del oscilador, ξ es el amortiguamiento expresado como una fracción del crítico, e i el número complejo $(-1)^{1/2}$.

En este caso $H_T(\omega)$ es una función que transfiere la aceleración del terreno al desplazamiento del oscilador. Una vez hecha esta multiplicación, la señal que se analiza corresponde a la respuesta de ese oscilador, de ahí que el valor esperado máximo que se calcula está asociado al desplazamiento máximo del oscilador.

En síntesis, el procedimiento que se utiliza para calcular el valor esperado (promedio) de la respuesta máxima de un oscilador consta de los siguientes pasos:

- Calcular $H_T(\omega)$ a partir de la ecuación 7.
- Calcular la amplitud de $H_T(\omega)$ y multiplicarla por el espectro de amplitudes de la excitación $|a_s(\omega)|$.
- Calcular el valor de la aceleración cuadrática media (ecuación 1) a partir del espectro de amplitudes de Fourier de la respuesta del oscilador, el cual se obtuvo en el paso anterior.
- Evaluar el factor pico a partir de las ecuaciones 3, 4, 5 y 6.
- Calcular el valor esperado de la respuesta máxima del oscilador (máximo desplazamiento) mediante la multiplicación del factor pico por la aceleración cuadrática media (ecuación 2).

El resultado que se obtiene debe considerarse como el promedio que resulta de analizar la respuesta del oscilador ante un número infinito de acelerogramas, los cuales corresponden a un mismo espectro de amplitudes de Fourier.

3. Estimación de parámetros

3.1. Características del sitio en estudio

La ciudad de Toluca se ubica en el valle de México dentro de una zona de peligro sísmico moderado producto de fallas locales y movimientos de subducción en la costa del Pacífico a 300 km de distancia aproximadamente (Romero, 1991). De acuerdo con las características dinámicas del terreno se distingue una zona de terreno firme con periodos de vibra-

ción menores a 0.4 s (zona A), y otra de terreno intermedio asociada a un periodo máximo de 0.52 s (zona B) (Ramírez *et al.*, 1993).

En lo referente a las características geológicas del sitio, éste se ubica dentro de cuencas lacustres preexistentes a las tres épocas de vulcanismo del periodo Terciario, las cuales fueron rellenadas por productos cineríticos de estas erupciones. La forma general del relieve topográfico del valle de Toluca, el cual está formado por lava andesítica, quedó definido en la primera época de erupciones. Posteriormente, los derrames de las demás erupciones incrementaron la altura y tamaño de los cerros y montañas formadas originalmente. Durante periodos de escasa actividad volcánica, se produjeron los rellenos aluviales que aparecen depositados en los valles. Los cerros que bordean a Toluca están formados por rocas extrusivas de tipo andesítico y algunas faldas de ellos son de naturaleza tobácea o brechoide. Casi en el centro de la ciudad hay una zona constituida por una roca extrusiva básica que corresponde a la última serie eruptiva.

Por lo que se refiere a la estratigrafía del sitio, se definen tres zonas (Castro *et al.*, 1990). La zona I está formada por cerros y lomeríos de roca basáltica o extrusiva intermedia, la cual subyace a una costra de tobas. La zona II comprende las faldas de los cerros y define una zona de transición entre las rocas y el terreno aluvial, está constituida por tobas cementadas. La zona III está formada por terrenos aluviales sobre los que se asienta la mayoría de la zona urbana. En ésta se identifica un primer estrato de material suelto seguido por mezclas de limos y arenas que requieren más de 30 golpes en la prueba de penetración estándar.

3.2. Función de transferencia

Se consideran dos estaciones de registro, por una parte se utiliza la información obtenida en la estación de Ciudad Universitaria (CU) en la ciudad de México (terreno duro), y por otra la de la estación del Centro de Enseñanza de Lenguas (CELE) en la ciudad de Toluca (terreno intermedio). La distancia aproximada entre ellas es de 60 km. La idea es transferir los espectros de Fourier registrados o estimados en CU a la estación del CELE, para lo cual se debe establecer una función de transferencia entre ambas estaciones.

El procedimiento mediante el cual se obtiene el espectro de Fourier correspondiente a un sitio que carece de registros sísmicos propios, se realiza con base en una función de transferencia empírica, para ello es necesario contar con al menos un registro (acelerograma) correspondiente a un

mismo evento registrado en ambos sitios. En el caso que se estudia se eligió el temblor del 10 de diciembre de 1994 que tuvo una magnitud de $M_s = 6.3$ y su epicentro se localizó cerca del poblado de La Unión, en el estado de Guerrero. En la figura 1 se presentan los acelerogramas correspondientes a dicho temblor registrados en ambas estaciones (componente NS). La aceleración máxima registrada durante este temblor en la estación CELE fue de 7.6 cm/s^2 , mientras que en CU de 4.48 cm/s^2 .

El cálculo de la función de transferencia empírica se realiza mediante el cociente entre el espectro correspondiente al sitio donde se desea estimar este parámetro y el espectro del sitio en el cual han sido registradas las señales cuyo espectro se desea transferir. En la figura 2 se muestra el cociente espectral obtenido de acuerdo con el procedimiento descrito anteriormente que corresponde al componente N-S del temblor del 10 de diciembre de 1994. Se utiliza este componente debido a que presentó mayor aceleración en comparación al componente E-O.

El procedimiento consiste en calcular el espectro de Fourier en la estación de CU y multiplicarlo por la función de transferencia para poder estimar el espectro correspondiente al sitio del CELE en Toluca. En el caso en que se plantea la ocurrencia de un temblor hipotético tanto el espectro de Fourier como la duración de la fase intensa que corresponden a CU se calculan de acuerdo con los modelos que se describen a continuación.

En forma deseable, debe considerarse como sitio de referencia una estación de terreno duro que esté libre de efectos de sitio y que se encuentre a una distancia cercana del sitio donde se quieren estimar los espectros de amplitudes de Fourier. En el caso de la estación de CU en la ciudad de México, a pesar de encontrarse en terreno duro se han observado importantes efectos de sitio relacionados con amplificaciones de las ondas sísmicas de cierto periodo (Ordaz y Singh, 1992). Sin embargo, es la estación más cercana a la estación del CELE que puede utilizarse como sitio de referencia para este trabajo.

Con todo rigor, la función de transferencia (cociente espectral) debe corresponder a un promedio de las distintas funciones de transferencia calculadas para los distintos sismos que se tengan registrados en ambas estaciones. Sin embargo, en el caso que se estudia sólo se dispone de un único registro para poder calcular la función de transferencia, el cual presenta niveles de aceleración muy bajos que pudiesen afectar los resultados al tratar de simular sismos de mayor tamaño. También, el origen o tipo de temblor de los registros que se utilicen para calcular la función de transferencia deben ser del mismo tipo del que se desea simular.

Figura 1. Acelerogramas correspondientes al temblor del 10 de diciembre de 1994 (componente NS) registrados en la estaciones CELE y CU.

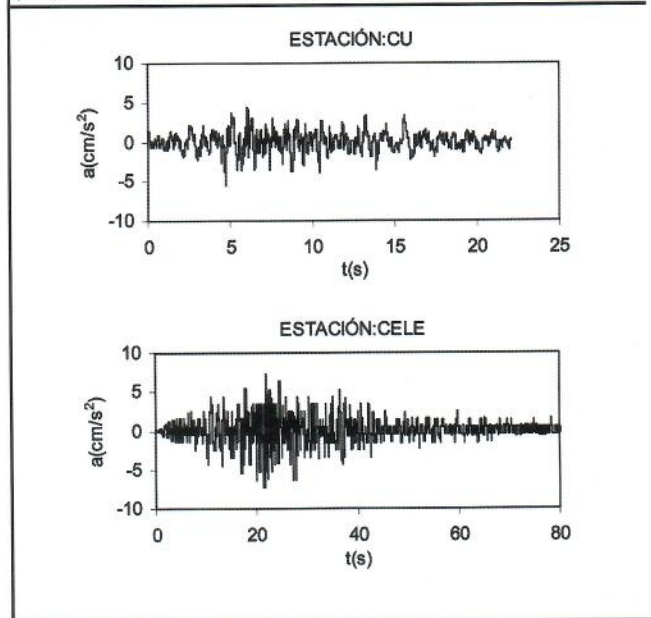
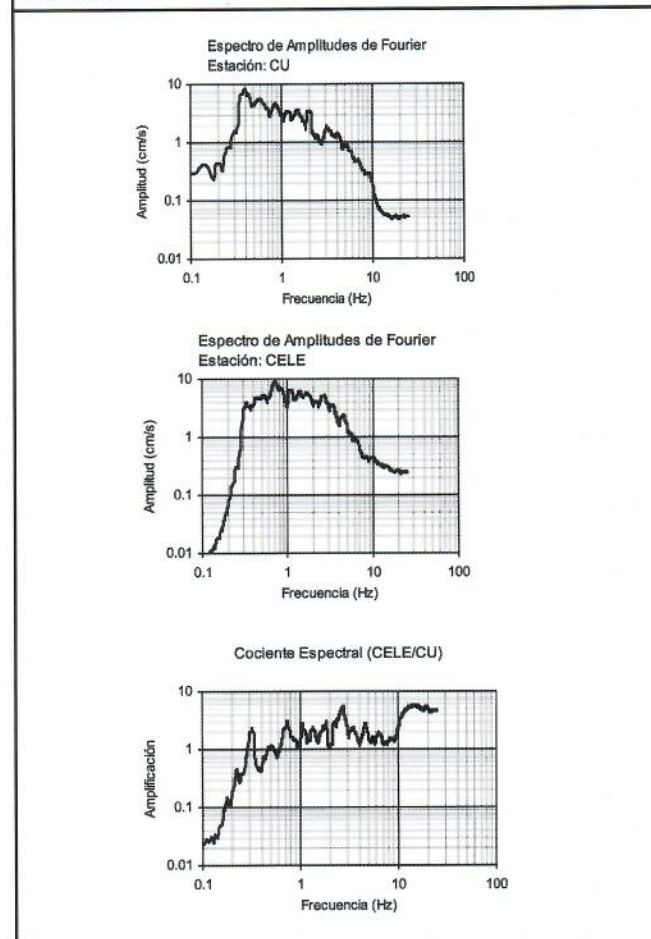


Figura 2. Espectros de Fourier y cociente espectral correspondientes al temblor del 10 de diciembre de 1994.



3.3. Modelo del espectro de amplitudes de Fourier

Para caracterizar al espectro de amplitudes de Fourier en la estación de CU se utiliza el modelo de fuente de Brune (ω^2), el cual se modifica en función de los efectos de trayecto y sitio, asociados a dicha estación (Ordaz y Singh, 1992). La expresión general con que se calcula es la siguiente:

$$A(f) = C S(f) \Gamma(f, R) H(f), \quad (8)$$

donde:

C = constante

$S(f)$ = espectro de aceleración en la fuente sísmica el cual se calcula de la siguiente forma:

$$S(f) = \frac{f^2 f_{ci}^2 M_{oi}}{f^2 + f_{ci}^2} \quad (9)$$

$$f_{ci} = 4.9 \times 10^6 \beta \left(\frac{\Delta\sigma}{M_{oi}} \right)^{1/3}, \quad (10)$$

donde:

f = frecuencia,

f_{ci} = frecuencia de esquina,

M_{oi} = momento sísmico en dina-cm,

β = 3.5 km/s la velocidad de las ondas de corte en el medio,

$\Delta\sigma$ = caída de esfuerzos en bares.

A su vez, $\Gamma(f, R)$ es un término que toma en cuenta el efecto de la atenuación del espectro de la fuente sísmica en función de la distancia epicentral. Esta función está dada por:

$$\Gamma(f, R) = G(R) e^{\left(\frac{-\pi f R}{\beta Q(f)} \right)}, \quad (11)$$

donde:

$$G(R) = \begin{cases} \frac{1}{R} & \text{para } R \leq 100 \text{ km} \\ \frac{1}{\sqrt{100 R}} & \text{para } R > 100 \text{ km} \end{cases}$$

R es la distancia epicentral en km y $Q(f) = Q_0 f^\epsilon$ el denominado factor de calidad.

En los cálculos que se realizaron se consideraron los siguientes valores, $Q_0 = 273$ y $\epsilon = 0.3$, los cuales fueron obtenidos a partir de una calibración hecha con base en el espectro del temblor del 19 de septiembre de 1985 en CU.

$H(f)$ es una función que toma en cuenta los efectos de amplificación regional para CU. Esta función se calcu-

ló comparando el espectro teórico obtenido de acuerdo con el modelo descrito anteriormente para el sismo del 19 de septiembre de 1985, con el que se calcula a partir del registro de dicho evento en esa estación.

3.4. Modelo de la duración de la fase intensa

La duración de la fase intensa se basa en la energía del acelerograma, la cual se mide a partir de la intensidad de Arias, I_a .

$$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^T a^2(t) dt, \quad (12)$$

donde:

$a(t)$ = acelerograma,

T = duración total del registro,

g = aceleración de la gravedad.

La duración de la fase intensa se define como el lapso de tiempo entre el cual se presenta el 5% y el 95% de la I_a (Ordaz y Reinoso, 1987), lo cual se interpreta como la duración que corresponde al tiempo bajo el cual se presenta la parte más relevante del acelerograma.

Para el caso de la ciudad de México se han realizado estudios a partir de los cuales se ha podido caracterizar la duración de la fase intensa $D(s)$, en función del periodo del sitio (Reinoso *et al.*, 1997).

$$D(s) = 40 + 13.2 T_s, \quad (13)$$

donde T_s es el periodo del sitio en estudio.

Algunos otros planteamientos relacionan la duración de la fase intensa del movimiento del suelo en roca con la distancia epicentral, R . Tal es el caso de la expresión propuesta por Herman (1985).

$$T_d = \frac{1}{f_c} + 0.05R, \quad (14)$$

donde:

T_d = duración de la fase intensa del movimiento del suelo en roca,

f_c = frecuencia fundamental del sitio en estudio.

En caso de considerar determinadas características de un oscilador en particular, tales como su fracción de amortiguamiento crítico, ξ , y su frecuencia natural, f_0 ; entonces la duración de la fase intensa de la respuesta del oscilador (T_0), puede estimarse a partir de la siguiente expresión (Boore y Joyner, 1984):

$$T_o = T_d + \frac{u^3}{2 \cdot \pi \cdot \xi \cdot f_o \left(u^3 + \frac{1}{3} \right)}, \quad (15)$$

donde $u = f_o \cdot T_d$

En este caso, la duración de la fase intensa se obtuvo a partir de la ecuación 13. Sin embargo, dicha expresión corresponde a características particulares del valle de México para temblores grandes de subducción, lo cual limita su uso. Cuando se estudien sitios con características diferentes, deberán utilizarse expresiones más generales para estimar la duración de la fase intensa del movimiento del suelo (ecuaciones: 14 y 15, por ejemplo); aun cuando éste no es un parámetro que haga variar en forma importante los resultados.

4. Análisis del peligro sísmico ante distintos escenarios posibles

4.1. Temblor del 19 de septiembre de 1985

Una primera aproximación al estimar el peligro sísmico consiste en evaluar escenarios posibles. Desde este punto de vista, el temblor del 19 de septiembre de 1985 ($M_s = 8.1$), que se originó en las costas de Michoacán a una distancia de 400 km de la ciudad de México, se considera un evento representativo de los temblores de subducción que pueden afectar a Toluca. De acuerdo con este criterio se calculó el espectro de respuesta elástico correspondiente a dicho temblor. Para ello se procedió de la siguiente manera:

a) Con base en los registros disponibles (acelerogramas) se calculó el espectro de Fourier en CU correspondiente a dicho evento.

b) Se calculó el espectro de Fourier en la ciudad de Toluca mediante el producto del espectro calculado en CU por la función de transferencia entre estos sitios, la cual se obtuvo a partir del cociente espectral correspondiente al temblor del 10 de diciembre de 1994 componente N-S.

c) Se estimó el espectro de respuesta elástica en el sitio de Toluca mediante la teoría de vibraciones aleatorias a partir del espectro de Fourier obtenido en el paso anterior y la duración de la fase intensa del movimiento.

En la figura 3 se presenta el espectro de Fourier calculado a partir del acelerograma registrado en CU junto con el espectro estimado para Toluca. Para estimar el espectro de respuesta se utilizó una duración de fase intensa $D_s = 41.2$ s la cual se obtuvo a partir del criterio de la intensidad de Arias que corresponde al registro en CU. Conviene hacer notar que los resultados no son muy sensibles a la elección de este parámetro. Esto se puede observar al analizar las ecuaciones 2, 3 y 4, en las cuales se aprecia que el valor de

D_s afecta el cálculo de N (ecuación 4), la cual a su vez define el valor del denominador factor pico (ecuación 3). Sin embargo, la forma algebraica que presenta dicha expresión, resulta muy poco sensible a variaciones en el valor de D_s . Por ejemplo, para un valor de $f = 1$ (ecuación 5), un aumento del 300% en el valor de D_s tan sólo representa un aumento del 12% en el valor del factor pico, mientras que para valores mayores de f , el aumento en el factor pico resulta necesariamente menor.

En la figura 4 se presenta el espectro de respuesta elástica estimado para Toluca correspondiente al temblor del 19 de septiembre de 1985. Es importante destacar que se considera a este sismo como el más intenso que se ha registrado en esta ciudad.

Figura 3. Espectros de Fourier observado en CU y estimado en CELE para el temblor del 19 de septiembre de 1985.

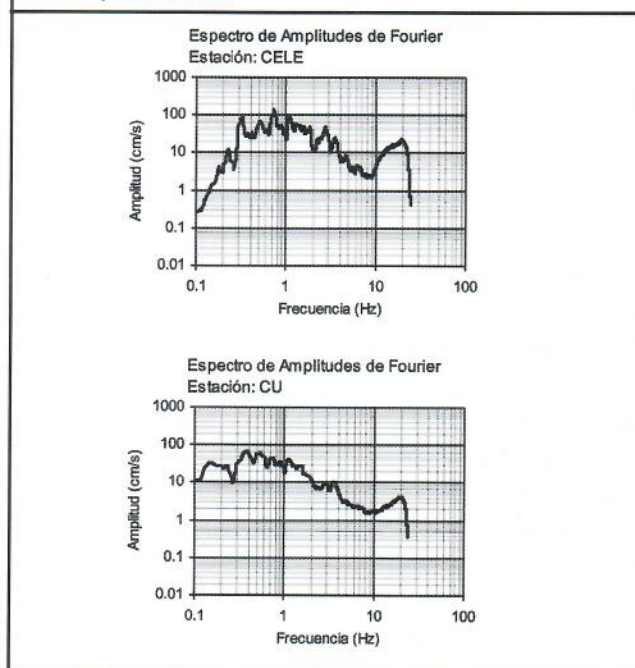
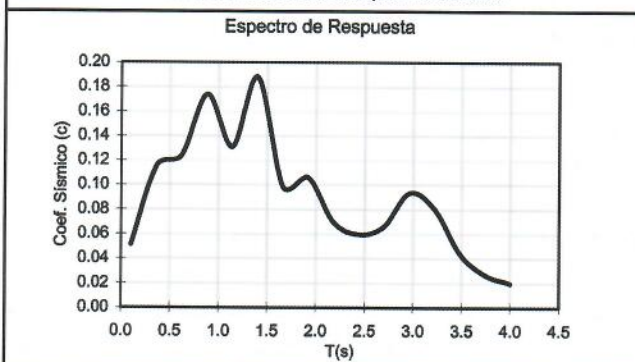


Figura 4. Espectro de respuesta elástica (5% de amortiguamiento) estimado para la estación del CELE durante el temblor del 19 de septiembre de 1985.



4.2. Temblor hipotético en la brecha de Guerrero

Existe una zona en la costa de Guerrero en cuya región noroeste (desde Petatlán hasta cerca de Acapulco) no se han producido grandes temblores en los últimos 80 años, y en cuya porción sureste (desde Acapulco hasta cerca de Ometepec) no han ocurrido temblores importantes desde los terremotos de 1957 y 1962 (Ordaz *et al.*, 1995). Actualmente se considera a esta zona como la de más alto potencial sísmico en el país, la cual en virtud de su ubicación y cantidad de energía por liberar se puede considerar como una de las de mayor peligro para la ciudad de Toluca.

Figura 5. Espectros de Fourier estimados en CU y CELE para el temblor hipotético de magnitud 8.3 en la brecha de Guerrero.

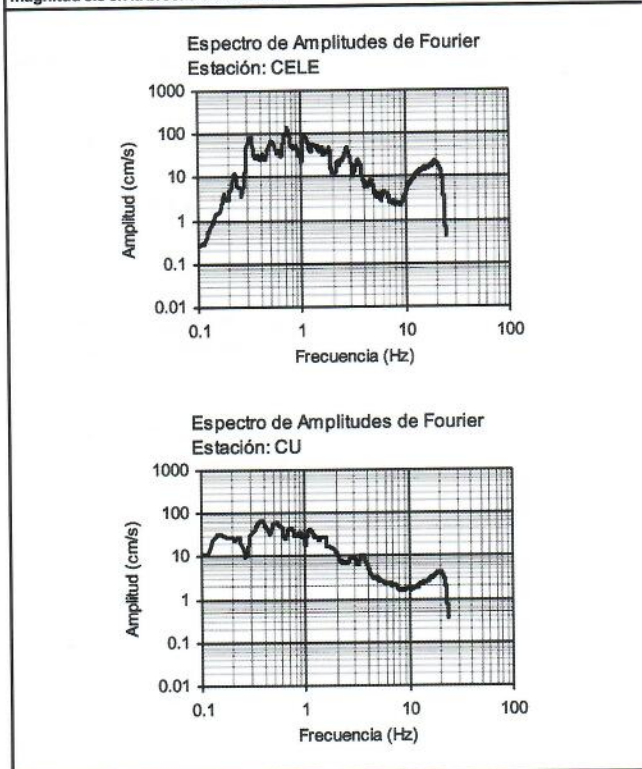
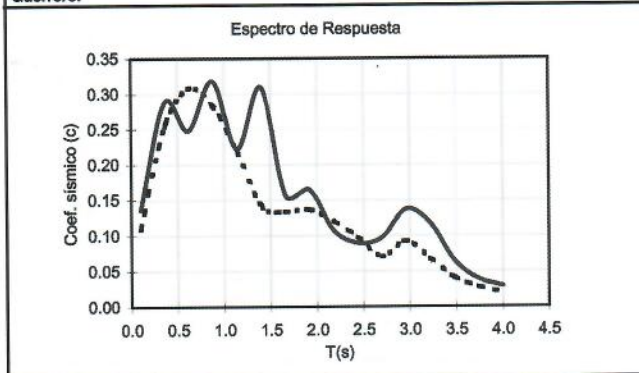


Figura 6. Espectros de respuesta (5% de amortiguamiento) estimados para la estación del CELE correspondientes a un temblor hipotético de magnitud 8.3 en la brecha de Guerrero.



El evento más desfavorable en cuanto a magnitud, corresponde a un sismo que sea producto del rompimiento total de dicha brecha. Para valorar tal evento se pueden considerar distintos criterios como el del momento sísmico acumulado o el de la extensión de la brecha. Comparando ambos planteamientos se estima como peor escenario posible un sismo de magnitud $M_s = 8.3$ (Valdés y Ramírez, 1995).

Dadas estas condiciones se estimó el espectro de respuesta elástica correspondiente a dicho evento. Para ello se procedió en forma similar a como se hizo para el caso del temblor del 19 de septiembre de 1985, sólo que al tratarse de un evento hipotético el espectro de amplitudes de Fourier correspondiente a CU tuvo que estimarse a partir de los modelos descritos anteriormente. Se consideró un momento sísmico $M_w = 2.5 \times 10^{28}$ (dina-cm), una caída de esfuerzos $\Delta\sigma = 200$ bares y una distancia epicentral $R = 280$ km (Ordaz *et al.*, 1993). La duración de la fase intensa que se utilizó fue $D_s = 45$ s.

En la figura 5 se presentan los espectros de Fourier estimados tanto para CU como para Toluca. En la figura 6 se muestra con línea continua el espectro de respuesta elástica estimado para Toluca correspondiente a este temblor hipotético calculado a partir de la teoría de vibraciones aleatorias. Es importante destacar la influencia que tiene la caída de esfuerzos en la respuesta que se estima, ya que se realizaron algunas pruebas utilizando caídas de esfuerzo de 300 y 100 bares en las cuales se obtuvieron coeficientes sísmicos máximos de 0.41 y 0.20, respectivamente. En la misma figura 6 se muestra para fines de comparación con línea discontinua, el espectro de respuesta correspondiente al mismo temblor hipotético obtenido de acuerdo con el método de simulación de acelerogramas que se describe y comenta en párrafos posteriores.

4.3. Temblores de falla normal y Acambay

Además de los dos sismos de subducción analizados previamente, se estimaron los espectros de respuesta correspondientes a otros dos tipos de temblores. Por una parte se analizó el caso de un temblor de fallamiento normal y por otra el caso de un sismo producido en la falla de Acambay, la cual se encuentra aproximadamente a 60 km de la ciudad de Toluca. Los espectros de amplitudes de Fourier utilizados corresponden a los espectros propuestos como máximos probables de estos dos tipos de temblores para la elaboración del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (Rosenbluth *et al.*, 1987).

Por lo que se refiere al temblor de Acambay, se consideró una magnitud $M_s = 7.0$, un momento sísmico $M_w = 3.5 \times 10^{26}$ (dina-cm), una caída de esfuerzos $\Delta\sigma = 100$ bares y una distancia epicentral $R = 80$ km respecto a CU. La duración de la fase intensa que se utilizó es $D_s = 30$ s. En la

figura 7 se muestra el espectro de respuesta elástica estimado para Toluca correspondiente a dicho temblor.

En el caso del temblor de fallamiento normal se consideró una magnitud $M_s = 6.5$, un momento sísmico $M_w = 7.0 \times 10^{25}$ (dina-cm), una caída de esfuerzos $\Delta\sigma = 200$ bares y una distancia epicentral $R = 80$ km. La duración de la fase intensa es $D_s = 30$ s. En la figura 8 se presenta el espectro de respuesta elástica estimado para la estación del CELE en Toluca correspondiente a dicho tipo de temblor.

5. Simulación de acelerogramas

El método de simulación empleado es el propuesto por Ordaz *et al.* (1993), el cual utiliza registros pequeños como funciones de Green empíricas; éste es similar al propuesto por Joyner y Boore, con la excepción que utiliza para la generación de los tiempos aleatorios de ruptura de las celdas elementales una densidad de probabilidades que genera registros sintéticos con un contenido de frecuencias congruente con el modelo sismológico ω^2 en toda la banda de interés.

La metodología empleada es aplicable a la estimación de movimientos sísmicos en condiciones diversas. Su formulación incluye de manera implícita los efectos de trayecto y de sitio. La obtención de resultados confiables depende de la selección de una función de Green adecuada, la cual debe corresponder a condiciones geofísicas de trayecto de las ondas y de sitio, similares a las del temblor que se intenta simular.

El propósito de la simulación ha sido estimar el movimiento del terreno en la ciudad de Toluca que resultaría de la ocurrencia de un temblor hipotético de magnitud 8.3 en la brecha de Guerrero, a partir de acelerogramas de temblores pequeños registrados en esta ciudad.

Al respecto se generaron acelerogramas sintéticos para la estación del CELE en Toluca (Valdés y Ramírez, 1995), en los cuales se utilizó el registro correspondiente al temblor del 10 de diciembre de 1994 componente NS como función de Green empírica. Se analizaron tres valores de la caída de esfuerzos (150, 200 y 250 bares), para cada uno de los cuales se realizó la simulación. Para la función de Green se utilizaron los siguientes valores de caída de esfuerzos y momento sísmico, respectivamente: $\Delta\sigma = 100$ bares y $M_w = 2.81838 \times 10^{25}$ dina-cm. Mientras que para el temblor hipotético el momento sísmico se consideró de $M_w = 1.6 \times 10^{28}$ (dina-cm). La distancia epicentral analizada fue de $R = 270$ km.

En la figura 5 se muestra con línea discontinua el espectro de respuesta elástica calculado a partir del acelerograma sintético correspondiente al temblor hipotético simulado

para una caída de esfuerzos de 250 bares. Bajo este planteamiento, las diferencias que se observan en los máximos valores de los coeficientes sísmicos en función de la caída de esfuerzos seleccionada, resultan moderadas (12% máximo).

Conclusiones

Con el análisis anterior se obtuvo el espectro de respuesta elástica para la ciudad de Toluca correspondiente al temblor del 19 de septiembre de 1985 cuya intensidad es la máxima registrada en esta ciudad, y del cual no se tiene ningún registro en el sitio. También se obtuvieron los espectros de respuesta para un temblor hipotético de magnitud 8.3 en la brecha de Guerrero, así como para otros dos tipos de temblores (falla normal y Acambay). De esta forma se pudo cuantificar el peligro sísmico a que se encuentra sometida la ciudad de Toluca, ya que los sismos analizados son considerados como los eventos más desfavorables que pudiesen afectarla.

Figura 7. Espectro de respuesta (5% de amortiguamiento) estimado para la estación del CELE correspondiente a un temblor hipotético de magnitud 7.0 en Acambay.

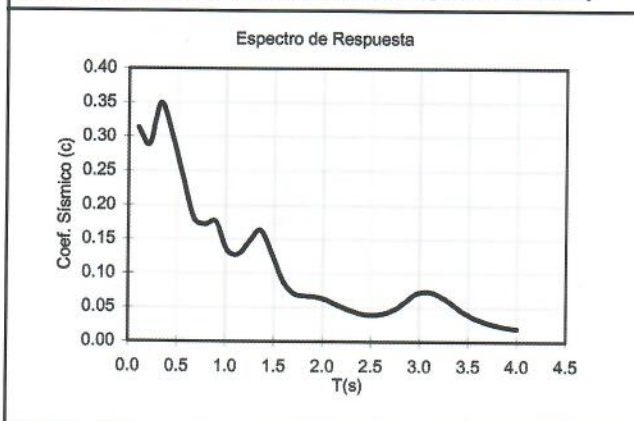
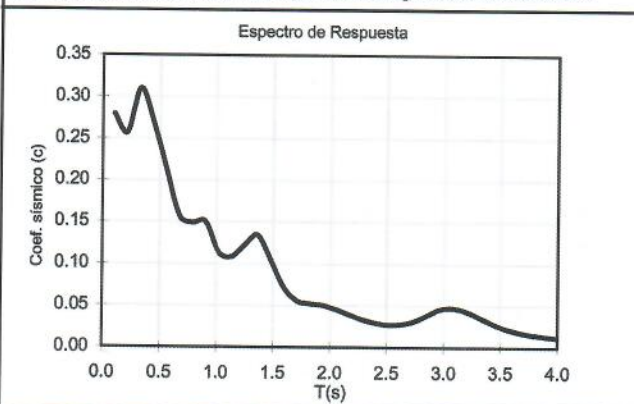


Figura 8. Espectro de respuesta (5% de amortiguamiento) estimado para la estación del CELE correspondiente a un temblor hipotético de magnitud 6.5 de falla normal.



Los resultados obtenidos son similares a los de otros estudios de distinto tipo que se han realizado, lo cual genera certidumbre en la posible aplicación con fines de diseño estructural de toda esta colección de resultados que han sido generados a partir de la escasa información instrumental de que se dispone actualmente en esta ciudad.

Muchas ciudades importantes en México se encuentran en una situación similar a la de Toluca, por ello los métodos utilizados son útiles como alternativas poderosas en la estimación del peligro sísmico en esos sitios.

Lo novedoso y útil de la técnica de vibraciones aleatorias presentada radica fundamentalmente en el uso de información de la ciudad de México con muchos estudios sobre el tema y la transferencia juiciosa de estos resultados a sitios con escasa información instrumental y estudios sísmicos propios.

En general, se observa que los resultados tanto de las simulaciones como de la teoría de vibraciones aleatorias, reflejan en alto grado características sismológicas realistas propias a una región en particular.

Bibliografía

- Boore, D. M. y W. B. Joyner (1984). "A Note on the Use of Random Vibration Theory to Predict Peak Amplitude of Transient Signals", *Bulletin of Seismological Society of America*. Núm. 74.
- Castro, G.; S. Castro y G. Soriano (1990). *Regionalización sísmica del Estado de México*. UAEM, Toluca, México.
- Clough, R. W. y J. Penzien (1993). *Dynamics of Structures*. 2a. ed., McGraw Hill.
- Delgado, V. y E. Mendoza (1997). *Estudio de peligro sísmico para Toluca*. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México.
- Esteva, L. (1976). "Seismicity", en Lomnitz C. y E. Rosenblueth, (eds). *Seismic Risk and Engineering Decisions*. Elsevier Scientific Pub Co, Amsterdam.
- _____ (1980). *Design of Earthquake Resistant Structures*. Cap. 3. Pentech Press, Londres, Inglaterra.
- Hermann, R. B. (1985). "An Extension of Random Vibration Theory Estimates of Strong Ground Motion to Large Distances", *Bulletin of Seismological Society of America*. Núm. 73.
- Lomnitz, C. (1994). "Los sismos, desastres tecnológicos. Inestabilidad del Sistema Naturaleza Sociedad", *Revista Ingeniería Civil* Núm. 297. Colegio de Ingenieros Civiles de México A.C., México.
- Meli, R. (1993). *Diseño estructural*. Limusa Noriega, México.
- Newmark, N.M. y E. Rosenblueth (1976). *Fundamentos de ingeniería sísmica*. Diana, México.
- Ordaz, M. (1987). "Uso de la teoría de vibraciones aleatorias en la determinación de los espectros de diseño del reglamento para las construcciones del D.F.", *Memorias del VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*. Querétaro, México. A155-A167.
- _____ y S. K. Singh (1992). "Source Spectra and Spectral Attenuation of Seismic Waves From Mexican Earthquakes and Evidence of Amplification in the Hill zone of Mexico City", *Bulletin of Seismological Society of America*. Núm. 82.
- _____; J. Arboleda y S. K. Singh (1993). "Un nuevo método para simular acelerogramas usando registros pequeños como funciones de Green empíricas". *Memorias del X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*. Puerto Vallarta, Jalisco. México.
- _____; F. J. Sánchez y S. K. Singh (1995). "La respuesta sísmica del valle de México (observaciones y modelos)", *Revista Ingeniería Civil* Núm. 317. Colegio de Ingenieros Civiles de México, México, D.F.
- Ramírez, H.; J. L.; Carmona M.; Flores, R. Vera, y J. Galván (1993). "Zonificación sísmica de la Ciudad de Toluca", *Memorias del X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*. Puerto Vallarta, Jalisco. México.
- Reinoso, E.; M. Ordaz; E. Ojeda; L. E. Pérez y M. Zárate (1994). "Actualización de la base de datos para la estimación del peligro sísmico en el Distrito Federal", *Reporte IJBS/CIS-94/10*.
- Reinoso, E.; R. Guerrero y M. Ordaz (1997). "Duración del movimiento durante sismos: implicaciones en la degradación estructural", *Apuntes de ingeniería sísmica II*. DEPEI, UNAM.
- Romero, D. (1991). *Análisis de riesgo sísmico para el Estado de México*. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México.
- Rosenblueth, E.; S. K. Singh; M. Ordaz y F. Sánchez-Sesma (1987). "Espectros de diseño para el Distrito Federal". *Memorias del VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*. Querétaro, México. A1-A17.
- Sánchez-Sesma, F.J. (1982). *Modelos de fuentes sísmicas*. Instituto de Ingeniería, UNAM, 51, México.
- Valdés, J. y H. Ramírez (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*. Núm. 51.