

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

Jesús Valdés González y Horacio Ramírez de Alba
Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del
Estado de México
Ciudad Universitaria, Toluca, México

RESUMEN

El propósito de este estudio es 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 registrados en dicha ciudad. El método de simulación que se emplea es el propuesto por Ordaz *et al* (1993), el cual utiliza registros pequeños como funciones de Green empíricas; dicho método es similar al propuesto por Joyner y Boore, excepto que se usa para la generación de los tiempos aleatorios de ruptura de celdas elementales una densidad de probabilidades que genera registros sintéticos con un contenido de frecuencias congruente con el modelo sísmológico ω^2 en toda la banda de interés. Los resultados que se obtienen se comparan con los de un estudio de peligro sísmico para la ciudad de Toluca realizado con anterioridad (Ramírez *et al*, 1994), el cual fundamentalmente se abocó a estimar la capacidad sísmica de los edificios dañados por los sismos de septiembre de 1985, cuya intensidad se considera la máxima registrada en dicha ciudad.

ABSTRACT

The goal of this study is to estimate the ground motion in Toluca city which would be recorded during the occurrence of a magnitude 8.3 hypothetical earthquake in the Guerrero gap, using some accelerograms recorded in that city. The simulation method used is that proposed by Ordaz *et al* (1993), which uses records of small earthquakes as empirical Green's functions. This method is similar to that proposed by Joyner and Boore, except that to generate the random rupture times of elementary cells, it uses a probability density function which generates synthetic ground motions that obey the ω^2 scaling model in the whole frequency band of interest. The results obtained are compared with those of a seismic hazard study that was made for Toluca city in the past (Ramírez *et al*, 1994). That study principally estimates the seismic capacity of the damaged buildings during the September 1985 earthquakes, whose intensity is the largest recorded in that city.

1. INTRODUCCIÓN

La ciudad de Toluca, capital del Estado de México, está localizada en una zona de moderado peligro sísmico, producto de fallas locales y movimientos asociados al fenómeno de subducción en la costa del Pacífico, a 300 km de la ciudad aproximadamente (Romero, 1991). De acuerdo con la estratigrafía de la región (Castro, 1990) se pueden definir tres zonas de terreno. La zona I está constituida por cerros y lomeríos de roca basáltica o extrusiva intermedia que subyace a una costra de materiales tobáceos; la zona II comprende las faldas de los cerros, que forman una zona de transición entre las rocas y el terreno aluvial, constituida principalmente por tobas muy cementadas; y la zona III corresponde a los terrenos aluviales sobre los cuales se asienta la mayor parte de la zona urbana, y está constituida generalmente por un primer estrato de material en estado suelto seguido por mezclas de arenas y limos que requieren de más de 30 golpes en la prueba de penetración estándar. Por lo que respecta a la clasificación del suelo para fines de diseño por sismo, se distinguen una zona de terreno firme con periodos del terreno 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.*, 1994).

La Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México tiene instaladas dos estaciones acelerográficas de campo libre en la ciudad de Toluca, las cuales forman parte de la red interuniversitaria de instrumentación sísmica. Se han podido registrar tres movimientos sísmicos, dos de los cuales corresponden a temblores de magnitudes moderadas ($M_s=5.6$ y $M_s=6.3$) y el tercero corresponde al temblor del 14 de septiembre de 1995 ($M_s=7.2$) el cual no causó un movimiento fuerte del terreno en dicha ciudad. Por esta razón resulta de interés práctico el estimar el movimiento del terreno en Toluca asociado a algún evento severo que se produzca a una distancia epicentral relativamente cercana ($R \leq 300$ km). En el presente artículo se sintetizan los acelerogramas de un temblor hipotético de magnitud 8.3 en la brecha de Guerrero que fuese registrado en la ciudad de Toluca, con la idea de valorar las máximas respuestas esperadas dentro del peor escenario posible que pudiese presentarse en

dicha ciudad y compararlas con aquellas que han sido determinadas mediante diversos estudios de riesgo sísmico realizados con anterioridad.

2. MÉTODO DE SIMULACIÓN

La idea central de los métodos de simulación de temblores que utilizan registros de eventos pequeños como funciones de Green empíricas consiste en suponer que un acelerograma generado por un temblor de pequeña magnitud esta 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 esta forma, 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 este estudio se emplea una técnica de simulación (Ordaz, Arboleda y Singh, 1993) 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 N (ec 1) veces la función de Green empírica escalada por un factor ζ (ec 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 ec 3.

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

$$\zeta = \left(\frac{Moe}{Mos} \right)^{-1/3} \left(\frac{\Delta\sigma e}{\Delta\sigma s} \right)^{4/3} \quad (2)$$

$$p(t) = \frac{1}{2\pi} \int \frac{[1 + \alpha (\omega / \omega_{ce})^2]^{1/2}}{1 + (\omega / \omega_{ce})^2} e^{i\omega t} d\omega$$

$$\text{con } \alpha = \frac{2\omega_{ce}^2}{\omega_{ce}^2 + \omega_{cs}^2} \quad (3)$$

Teniéndose que Moe , $\Delta\sigma e$ y ω_{ce} son los parámetros del sismo objetivo, mientras que Mos , $\Delta\sigma s$ y ω_{cs} 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, la cual se define mediante la siguiente expresión:

$$\omega_{cs} = 4.9 \times 10^6 (2\pi \beta) (\Delta\sigma / Mo)^{1/3} \quad (4)$$

En la que β es la velocidad de propagación (en km/s) de las ondas S, $\Delta\sigma$ la caída de esfuerzos (en bar) y Mo el momento sísmico definido anteriormente.

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 (ecs 1 y 2), el cual 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 ω^2 . En la obtención del valor esperado del espectro de amplitudes de Fourier, se considera una fuente sísmica puntual dividida en N celdas elementales, cada una de las cuales genera comenzando en un instante t_i , $i=1, \dots, N$, una señal cuyo espectro de Fourier esta escalado mediante una constante ζ ;

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 tal que, en promedio y para todas las frecuencias, se obtengan temblores con un contenido espectral congruente con el modelo de escala-

miento ω^2 , se deben igualar las expresiones correspondientes a los cocientes entre los espectros de amplitudes para cualquier valor de ω .

3. REGISTROS DE LA RED ACELEROGRÁFICA DE TOLUCA

En la actualidad la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México opera dos estaciones de registro, como parte de la red interuniversitaria de instrumentación sísmica. Una de las estaciones se ubica en el Centro de Lenguas de la propia Universidad y consta de un acelerógrafo Kinematics SSA-2 con acelerómetros triaxiales de sensibilidad 2 g. La otra estación se localiza en la Facultad de Ingeniería y cuenta con un acelerógrafo Kinematics SSA-2 con acelerómetros triaxiales de sensibilidad 1 g. Hasta la fecha han podido ser registrados tres movimientos sísmicos en dichas estaciones; el primero de ellos corresponde al sismo del 22 de mayo de 1994 ($M_s=5.6$), el segundo al sismo del 10 de diciembre de 1994 ($M_s=6.3$), y el tercero al temblor del 14 de septiembre de 1995 ($M_s=7.2$). 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 será utilizado como función de Green el registro correspondiente al temblor del 10 de diciembre de 1994 registrado en la estación ubicada en el Centro de Lenguas; de ahí que los resultados que se obtuvieron son válidos para condiciones del terreno semejantes a las prevalecientes a la zona donde se ubica dicha estación, y la cual de acuerdo a la clasificación hecha mediante un estudio de vibraciones ambientales se clasifica como de terreno firme (Ramírez *et al*, 1994). Los datos básicos correspondientes a dicho evento se resumen en la Tabla 1.

Es importante señalar que de acuerdo a la clasificación del terreno en función de sus características dinámicas, se considera como terreno intermedio aquel cuyo periodo este comprendido entre 0.4 s y 1 s (Iglesias *et al*, 1994); teniéndose que el periodo del terreno que fue determinado en el sitio más cercano a dicha estación acelerográfica reportó un valor de 0.38 s; razón por la cual se puede considerar

Tabla 1. Datos básicos del sistema cuyo registro se utiliza como función de Green

Características generales	
Fecha del evento:	10 de diciembre de 1994
Hora de inicio:	10:18 horas
Epicentro:	Río Balsas (18.02 Norte, 101.56 Oeste) cerca del poblado de La Unión, Gro.
Magnitud:	6.3 Richter

Tabla de valores máximos

	Componentes		
	N-S	E-O	VER.
Aceleraciones cm/s ²			
Centro de Lenguas	7.6	-7.47	4.7
Velocidad cm/s			
Centro de Lenguas	0.83	-0.73	-0.44
Desplazamiento cm			
Centro de Lenguas	0.18	0.18	0.09

que las características del terreno en este sitio son muy semejantes a las del terreno intermedio.

La preparación de los registros para poder ser utilizados en la simulación de acelerogramas como funciones de Green empíricas, se aboca exclusivamente a su corrección por línea base y a un prefiltrado que separa el ruido producido en la señal. En la figura 1 se muestra el registro corregido y prefiltrado que fue utilizado como función de Green empírica. El prefiltrado de los registros de ambos temblores se realizó mediante el filtro denominado "Bandpass". El intervalo de frecuencias filtradas abarca de 0.15 Hz a 0.25 Hz en el límite inferior, y 47 Hz a 50 Hz en el superior.

4. SIMULACIÓN DEL PEOR ESCENARIO POSIBLE PARA LA CIUDAD DE TOLUCA

4.1 Planteamiento determinista

El planteamiento determinista se basa en la cuantificación de los efectos del evento más desfavorable que razonablemente se considere llegue a ocurrir. De esta forma puede revelarse que el evento sísmico de subducción en la costa del Pacífico de mayor importancia debido a su

tamaño, es el correspondiente a la liberación de la energía acumulada en la brecha de Guerrero, en cuya zona noroeste (desde Petatlán hasta cerca de Acapulco) no se han producido grandes temblores en los últimos 80 años, y cuya porción sureste (desde Acapulco hasta cerca de Ometepec) no ha dado lugar a eventos de importancia desde los terremotos de 1957 y 1962 (Ordaz *et al*, 1995). De ahí que actualmente se considere a esta zona como la de más alto potencial sísmico en el país, la cual en virtud de su ubicación y cantidad de energía en estado latente de liberación puede valorarse como una de las de mayor peligro para la ciudad de Toluca.

El evento más desfavorable en cuanto a magnitud se refiere, corresponde a un sismo que sea producto del rompimiento total de dicha brecha. Para valorar el tamaño de dicho evento pueden considerarse los siguientes criterios:

a).-Momento sísmico acumulado. Este criterio considera que el momento sísmico de la falla (M_0) esta en un proceso de liberación limitado por envolventes. Se tiene un déficit actual estimado entre 15 y 20 x 10²⁷ dina-cm. Puede calcularse de igual forma, M_0 mediante la siguiente relación, la cual involucra al periodo de retorno:

$$\log T_R = 1/3 \log M_0 - 7.5 \quad (5)$$

de ahí que suponiendo un periodo de retorno T_R de 80 años se tendría un momento sísmico acumulado de 16 x 10²⁷ dina-cm. De esta manera, utilizando la relación entre la magnitud de momento, M_w , y el momento sísmico promedio, se obtiene lo siguiente:

$$M_w = 2/3 \log M_0 - 10.7 \quad (6)$$

donde M_w es la magnitud de momento y M_0 el momento sísmico de la falla. Sustituyendo $M_0=16 \times 10^{27}$ resulta $M_w=8.1$, que puede considerarse igual a M_s para magnitudes $M_w > 6$ (Ordaz y Singh, 1995)

b).-Extensión de la brecha. El límite noroeste de la brecha está dado por el área de ruptura del sismo de Petatlán de 1979, $M_s=7.6$ (figura 2). El límite sureste puede llegar hasta la barrera producida por la segmentación de la placa en

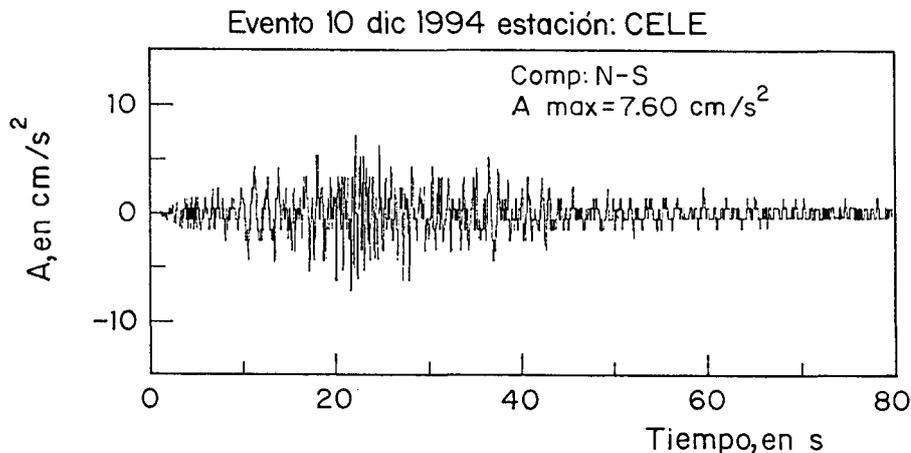


Fig 1. Acelerograma corregido y prefiltrado que fue utilizado como función de Green

la región, es decir, 99° W. Los reportes del terremoto de 1907 también sugieren este límite para la propagación de la ruptura durante este sismo. Con base en estos límites, se puede concluir que la extensión máxima de la brecha es de 230 km. Tomando el ancho de la falla como 80 km (Singh *et al*, 1985), el área máxima que puede romperse en un terremoto es de 18 000 km^2 . De ahí que usando la relación empírica entre la magnitud de ondas superficiales M_s , y el área de ruptura A en km^2 (Singh *et al*, 1980)

$$M_s = 0.8871 \log A + 4.532 \quad (7)$$

se obtiene un valor de 8.3 para la magnitud máxima esperada, la cual se ajusta adecuadamente a otras estimaciones realizadas.

Comparando ambos criterios, se estima como peor escenario posible $M_s=8.3$.

4.2 Simulación del temblor hipotético en la brecha de Guerrero

A este respecto se generaron acelerogramas sintéticos para la estación del Centro de Lenguas, correspondientes a un temblor hipotético en la brecha de Guerrero de magnitud 8.3 y con una distancia epicentral igual a la del evento del 10 de diciembre de 1994 ($R=270$ km). Se usó como función de Green el registro obte-

nido en dicha estación componente NS, durante el mencionado temblor. En este caso la caída de esfuerzos del temblor hipotético es desconocida y debe asignarse; por lo que se eligieron tres valores (150, 200 y 250 bar), para cada uno de los cuales se realizó la simulación. Para la función de Green se utilizaron los siguientes valores: $\Delta\sigma=100$ bar y $M_0=2.81838 \times 10^{25}$ dina-cm. Mientras que para el temblor hipotético el momento sísmico se consideró de 1.6×10^{28} dina-cm, el cual se obtuvo al sustituir la magnitud de $M_s=8.3$ en la siguiente expresión:

$$\log M_0 = 1.5 M_s + 16 \quad (8)$$

En la figura 3 se presentan los acelerogramas sintéticos generados, y en la tabla 2 se muestra un resumen de los resultados que se obtuvieron. Los espectros de respuesta elásticos tanto de las simulaciones como de la función de Green se presentan en la figura 4.

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 seleccionada; así se tiene que los factores de diferencia van desde un 43.50% para una caída de esfuerzos de 200 bar, hasta un 57.50% para una caída de esfuerzos de 250 bar; ambos respecto a la aceleración máxima que se registró

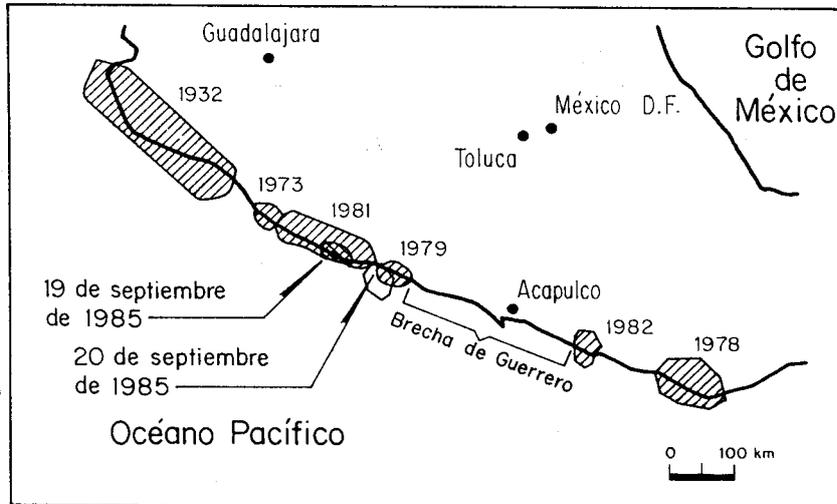


Fig 2. Localización de la Brecha de Guerrero en referencia a la ciudad de Toluca

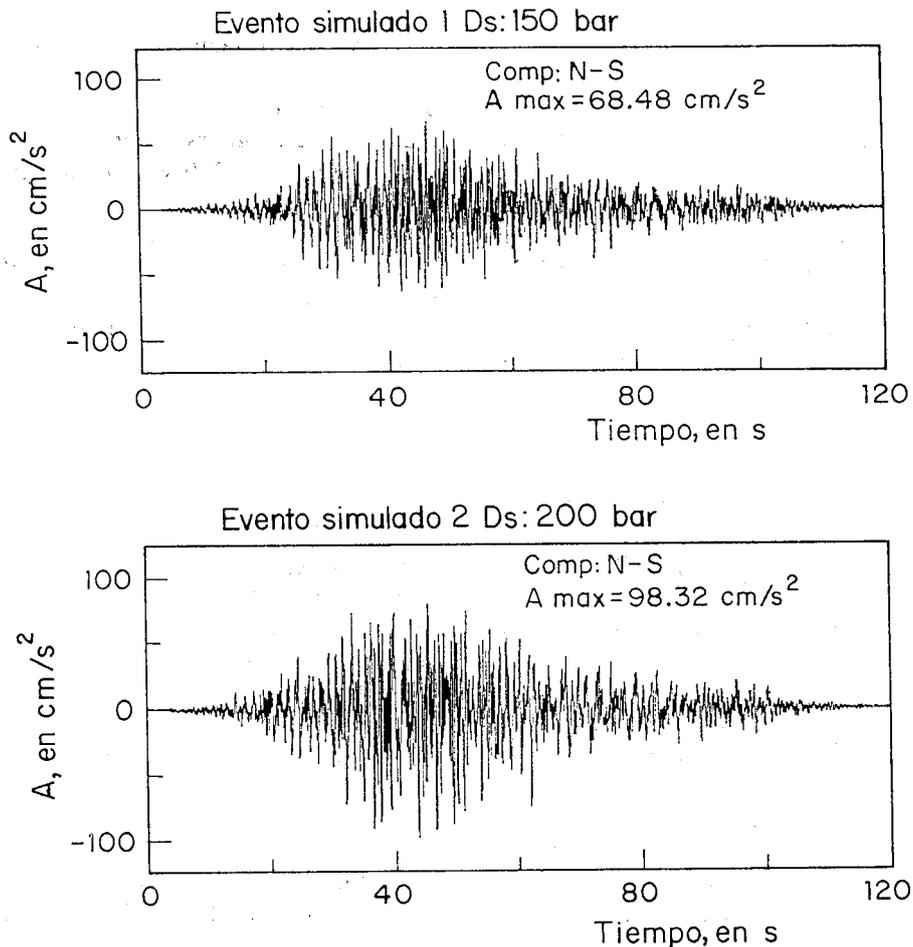


Fig 3(a). Acelerogramas simulados correspondientes a caídas de esfuerzos de 150 y 200 bar

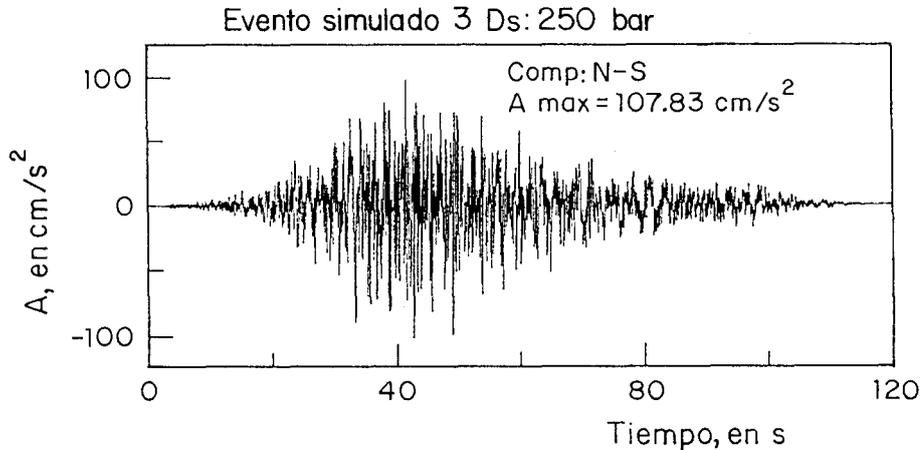


Fig 3(b). Acelerograma simulado correspondiente a una caída de esfuerzos de 250 bar

para la simulación hecha con una caída de esfuerzos de 150 bar. Se aprecia una notable tendencia a ser cada vez menos sensible la variación en la aceleración máxima conforme aumenta el valor de la caída de esfuerzos. Por lo que respecta a las ordenadas espectrales máximas que se producen, la caída de esfuerzos seleccionada resulta poco relevante, ya que en este caso el factor de diferencia máximo que se tuvo fue de un 12%. Esto da confianza acerca de la viabilidad del método de simulación propuesto, ya que si por una parte existe gran incertidumbre en la elección de la caída de esfuerzos, esta no aumenta de manera importante la incertidumbre en los resultados.

Comparando el coeficiente sísmico que resulta de la ordenada espectral máxima, con el coeficiente sísmico propuesto en el estudio de "Zonificación Sísmica para la ciudad de

Toluca" (Ramírez *et al*, 1994) al que se hizo referencia en párrafos anteriores, se tiene que mientras dicho estudio sugiere un valor de $c=0.20$ (terreno firme), como resultado de esta simulación se obtiene un valor de $c=0.32$. Dicha variación puede justificarse, en la medida que no fue incluida en esa zonificación la influencia de la brecha de Guerrero, ya que principalmente se basó en las intensidades históricas registradas, dentro de las cuales gobernó la del sismo del 19 de septiembre de 1985. Sin embargo, para terreno intermedio se propone un coeficiente sísmico de 0.32, valor coincidente con el que se obtuvo en esta simulación. Y realmente la estación del Centro de Lenguas esta muy próxima a dicho tipo de terreno, ya que el periodo del lugar donde se ubica es de alrededor de 0.38 s, y el intervalo de periodos correspondiente a terreno intermedio varía de 1 a 0.4 s.

Tabla 2. Resultados de la simulación (aceleraciones máximas del terreno y coeficientes sísmicos máximos)

Evento	Ds (bar)	Acel. máxima del terreno cm/s^2	c (máx)
Simulador 1	150	68.48	0.2854
Simulador 2	200	98.32	0.3193
Simulador 3	250	107.83	0.3214

Analizando los espectros de respuesta elásticos que se obtienen (figura 4), resulta que hay un grupo de estructuras cuyos periodos van de 0.25 a 1.5 s que tienen una sollicitación mayor que la resistencia que tendrían de haber sido diseñadas con un coeficiente sísmico de 0.20 ($0.20 \times 981 = 196.20 \text{ cm/s}^2$), valor que ha llegado a considerarse como viable para ser recomendado en el reglamento de construcciones local. Sin embargo la relación que se puede establecer entre un

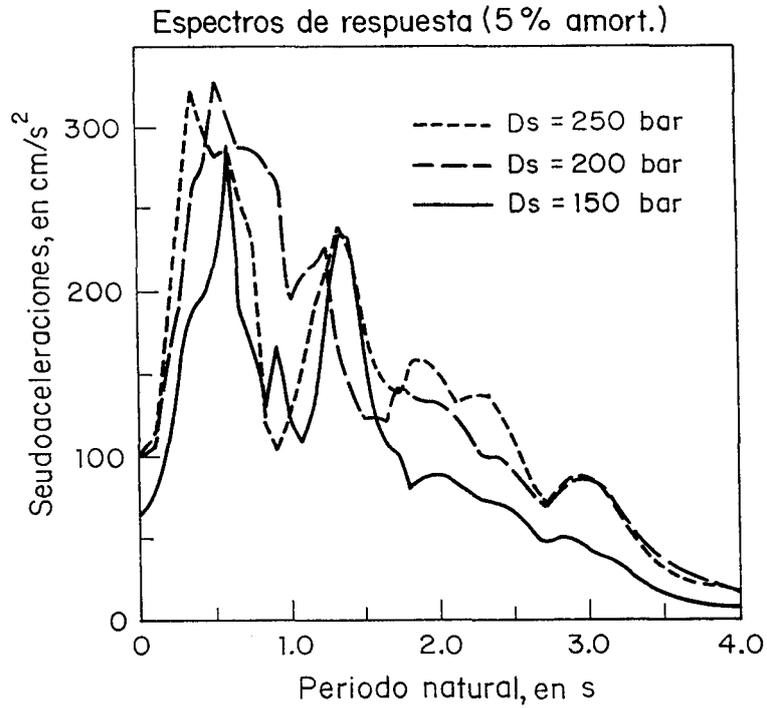


Fig 4(a). Espectros de respuesta para los eventos simulados

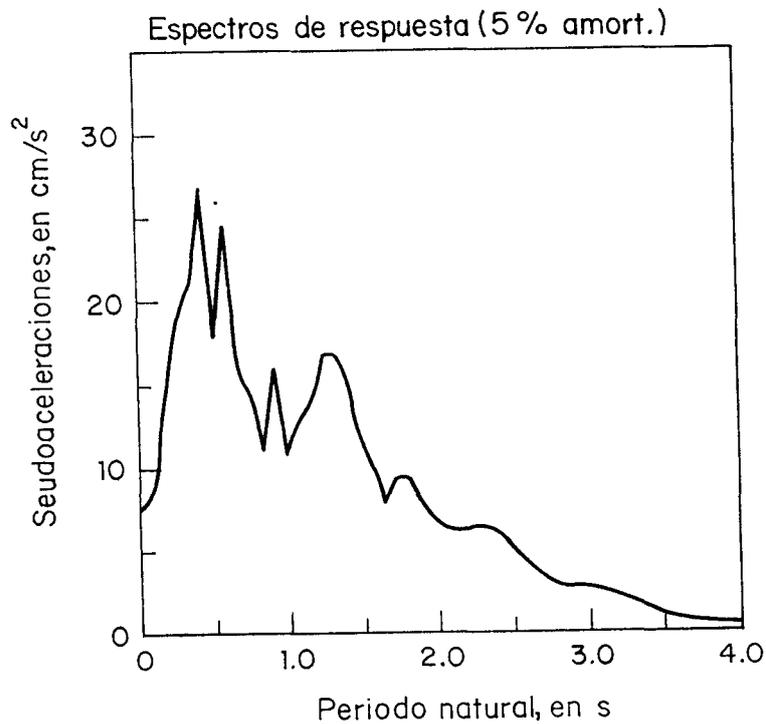


Fig 4(b). Espectro de repuesta de la función de Green

espectro de respuesta del temblor máximo probable y el espectro de diseño, presenta algunas consideraciones que deben valorarse de manera especial; como pueden ser la sobrerresistencia y las reducciones de las ordenadas espectrales por efectos de comportamiento no lineal del sistema. De ahí que en general, se consideren como factibles los coeficientes sísmicos no reducidos por ductilidad que han sido propuestos.

De la figura 5 se puede observar que no es válido el escalar el espectro de respuesta de la función de Green por una constante, para de esta forma obtener el espectro resultante de la simulación; toda vez que como se aprecia el valor de dicho factor presenta variaciones importantes en función del periodo.

Por último, es importante mencionar que una de las hipótesis que se consideraron al realizar esta simulación, se refiere a que la función de Green utilizada proviene de la región sismogénica que corresponde a la brecha de Guerrero, o en su caso de alguna con características de liberación de energía y generación de ondas

similares a esta. Pero en rigor debe usarse la misma región, ya que de otra manera se espera cierta alteración de la influencia del trayecto.

5. CONCLUSIONES

Se han generado acelerogramas sintéticos para la ciudad de Toluca mediante un método de simulación que utiliza registros de temblores pequeños como funciones de Green empíricas. El método posee la cualidad de generar movimientos fuertes cuyo espectro de Fourier está escalado respecto al de la función de Green siguiendo el modelo sismológico ω^2 . Se observa que el contenido espectral de estos acelerogramas resulta adecuado para una banda de frecuencias razonable. Las formas generales de los registros sintéticos son también congruentes con las de los registros reales.

Se simuló la ocurrencia de un temblor hipotético de magnitud 8.3 en la brecha de Guerrero, el cual se considera como el peor escenario posible que puede presentarse en la ciudad de Toluca. De dicho estudio se aprecia

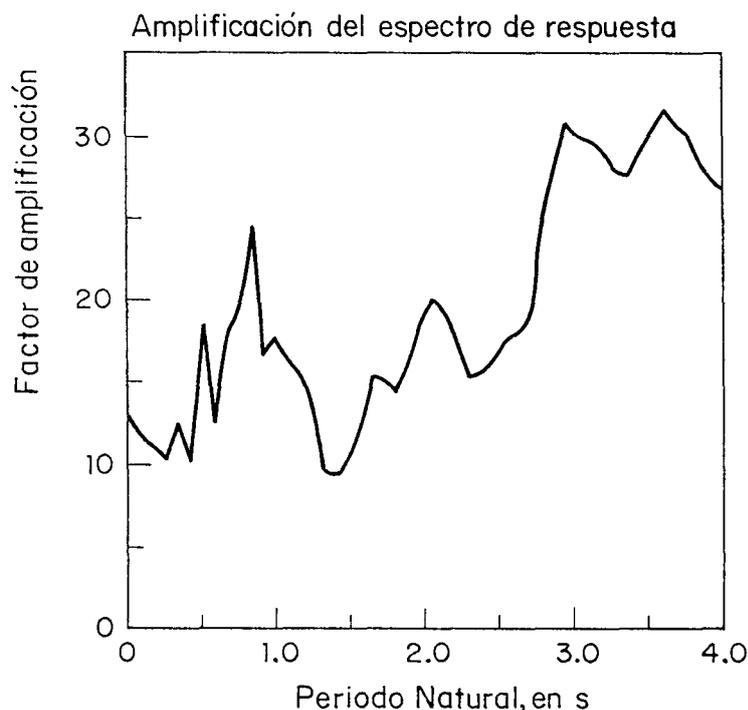


Fig 5. Factores de amplificación del espectro de respuesta de la simulación 2, respecto al de la función de Green

la poca influencia de los valores en las caídas de esfuerzo que sean asignados al temblor grande, en los resultados que se obtienen correspondientes a las ordenadas espectrales máximas, observándose un factor de diferencia de alrededor de un 12%; para una fluctuación en la caída de esfuerzos que va de 150 a 250 bars. Dicha variación sí resulta apreciable en los valores de las aceleraciones máximas que se registran. Al respecto se tienen diferencias de hasta un 57.50% para el mismo rango de fluctuación en la caída de esfuerzos; no obstante, se aprecia que esta variación es cada vez menos sensible en la medida que crece el valor de la caída de esfuerzos. Por lo que respecta al coeficiente sísmico de diseño, el máximo valor que se obtuvo fué de $c=0.32$; que correspondió a la simulación realizada para una caída de esfuerzos de 250 bars. Dicho valor excede al recomendado en estudios de riesgo sísmico realizados para la ciudad de Toluca, los cuales sugieren un valor de $c=0.20$ para terreno firme, y $c=0.32$ para terreno intermedio. Sin embargo, no obstante que la estación del Centro de Lenguas a la cuál están referidos todos los resultados que se han obtenido en este trabajo se considera ubicada en terreno firme, está muy próxima al terreno intermedio; por lo que el resultado en este sentido se considera razonable.

Se puede considerar que el objetivo que se perseguía al realizar este trabajo ha sido cumplido, toda vez que se han generado acelerogramas asociados a la ocurrencia de un evento sísmico de importancia en lo referente a su magnitud, los cuales reflejan las características sismológicas prevalecientes en la ciudad de Toluca. En vista de la disponibilidad actual de registros de temblores pequeños, además de las expectativas que se tienen al respecto para un futuro cercano, se considera que la simulación de acelerogramas es una alternativa poderosa para la estimación, tanto de movimientos fuertes ante temblores futuros, como para la realización de estudios de riesgo sísmico que se fundamenten en una colección de eventos históricos registrados. Ello se observa toda vez que los resultados de las simulaciones reflejan en alto grado características sismológicas realistas propias a una región en particular.

6. AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen a M. Ordaz su ayuda en la realización de este trabajo. Los datos usados en este estudio fueron obtenidos de la Red Interuniversitaria de Instrumentación Sísmica en la Cd. de Toluca.

REFERENCIAS

- Brune, J.N.**, (1970), "Tectonics stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes", *J. Geophys Res*, 75, 4997-5009.
- Carballo, Jorge, E.**, (1994). "Estudio de riesgo sísmico para Chilpancingo". Tesis para la obtención del grado de Maestro en Ingeniería (Estructuras), Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.
- Castro, G., Castro, S y Soriano, G.**, (1990). "Regionalización Sísmica del Estado de México". UAEM .
- Hamada, K.**, (1991). "General Seismology", International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Building Research Institute, Ministry of Construction, Tsukuba, Japan.
- Iglesias, J., Ramírez, M., Carballo, J., Jara, M., Guerrero, J.J., Juárez, H., Gómez-Bernal, A y J. Aguilar**, (1994). "Zonificación Sísmica de Ciudades en México"., Universidad Autónoma Metropolitana., México, D.F.
- Irikura, K.**, (1991). "Strong Ground Motion", International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Building Research Institute, Ministry of Construction, Tsukuba, Japan.
- Joyner, W.B. y Boore, D.M.**, (1988), "Measurement, characterization, and prediction of strong ground motion". *Proc. of Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Park City, Utah, June 27-30, Am. Soc. Civil Engineers, 43-102.

Generación de acelerogramas sintéticos para la ciudad de Toluca...

- Ordaz, M., Arboleda, J. y S.K. Singh, (1993).** "Un nuevo método para simular acelerogramas usando registros pequeños como funciones de Green empíricas". X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Puerto Vallarta, Jalisco. México.
- Ordaz, M., Sánchez Sesma, F.J. y S.K. Singh, (1995).** "La respuesta sísmica del Valle de México (Observaciones y Modelos)". Revista Ingeniería Civil, Editada por el Colegio de Ingenieros Civiles de México., 317, 28-35, México D.F.
- Ramírez, H., Carmona, J.L., Flores, M., Vera, R. y J. Galván, (1994).** "Zonificación Sísmica de la Ciudad de Toluca". Universidad Autónoma del Estado de México., Toluca, México.
- Reporte del Sismo del 22 de Mayo de 1994, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México; Toluca, México (Enero 1995).
- Reporte del Sismo del 10 de Diciembre de 1994, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México; Toluca, México (Enero 1995).
- Romero, D., (1991).** "Análisis de Riesgo Sísmico para el Estado de México". Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería. UAEM.
- Singh, S.K., Bazán, E. y L. Esteva, (1980).** Expected earthquake magnitude at a fault, Bull. Seism. Soc. Am., 70, 903-914.
- Singh, S.K., Suárez, G. y T. Domínguez, (1985).** The Oaxaca Mexico Earthquake of 1931: lithospheric normal faulting in the subducted Cocos plate, Nature, 317, 56-58.