

## MODELACIÓN DE ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS PARA SU USO EN EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL – APLICACIÓN A LA CIUDAD DE SALTA

Lía E. Orosco<sup>a</sup>, Mika Haarala Orosco<sup>b</sup>, Jorge Crempien-Laborie<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Facultad de Ingeniería e Informática, Universidad Católica de Salta, Campo Castañares, 4400 Salta, Argentina, [liaorosco@ucasal.net](mailto:liaorosco@ucasal.net), <http://www.ucasal.net>

<sup>b</sup>Acrenet, Oy., La Caldera, (4401) Salta, Argentina, [mhaarala@uolsinectis.com.ar](mailto:mhaarala@uolsinectis.com.ar)

<sup>c</sup>Facultad de Ingeniería., Universidad de Los Andes, Las Condes, Santiago de Chile, [jcrempie@uandes.cl](mailto:jcrempie@uandes.cl)

**Palabras Clave:** acelerogramas artificiales, modelos no estacionarios, Salta, análisis estructural.

**Resumen.** Se presenta en este trabajo la modelación de acelerogramas artificiales para la Ciudad de Salta, con el objetivo de ser utilizados en estudios de la respuesta estructural de edificios, puentes, suelos (estudios de microzonificación), etc.

El modelo es del tipo evolutivo e intenta describir la no estacionaridad temporal y frecuencial propia de los movimientos de suelo debido a eventos sísmicos. Se considera el movimiento como compuesto de varios procesos estocásticos uniformemente modulados, operándose tal división en el campo de la frecuencia, en intervalos de energía no superpuestos.

La modulación temporal se realiza mediante una función tipo beta, modificada por dos parámetros que se suman a los tres originales de la función. El cálculo de los cinco parámetros se hace mediante ajuste no lineal, considerando la energía en cada franja como la función a ajustar por mínimos cuadrados. La división del espectro de amplitudes de Fourier se realiza considerando los "paquetes" de energía en que se presenta la señal, considerando como límites de cada banda los valores nulos o casi nulos del espectro.

Este modelo se aplica a reproducir las características temporales y frecuenciales de registros de sismos registrados en la Ciudad de Salta, de moderada magnitud y campo lejano.

La bondad del proceso de simulación es definido a partir de la comparación entre los acelerogramas sintéticos obtenidos con los reales, como así también se comparan sus espectros de respuesta para evaluar su comportamiento en el campo frecuencial.

Se aplica el modelo a generar sismos intensos a partir de registros de eventos menos intensos. Como no se cuenta con registros de eventos de gran magnitud en la Ciudad de Salta, correspondientes a las mismas zonas sismogénicas que los disponibles, se muestran los resultados para la región de Andalucía en España, comparando los espectros de respuesta con los obtenidos por otros métodos.

## 1 INTRODUCCIÓN

Una vasta región de Argentina colindante con los Andes está amenazada por una actividad sísmica que va de moderada a intensa. A tal fin, las obras civiles deben ser diseñadas adecuadamente para que puedan responder ante tal sollicitación dinámica en forma apropiada.

Entre los métodos de análisis, los dinámicos lineales y no lineales son los más adecuados para ciertas obras de importancia o con características únicas. En ellos la acción sísmica se define en forma de historias en el tiempo actuando en la base de los mismos. No se cuenta con un gran número de registros sísmicos intensos para utilizarlos con fines de diseño, por lo que surge la necesidad de simularlos, abriéndose un campo de estudio en el área de la Ingeniería Sísmica que ha hecho varias propuestas desde la década del '40 del siglo pasado.

En particular, la Ciudad de Salta cuenta con antecedentes históricos de sismos intensos, que dieron origen a una tradición religiosa arraigada fuertemente en el sentimiento popular. Esta actividad presenta períodos de retorno muy grandes y por ello hasta el presente no se cuenta con registros de sismos intensos. De todos modos, el Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES) ha ampliado grandemente en los últimos años la red nacional de acelerómetros, por lo que es posible ahora registrar los sismos moderados que naturalmente ocurren con mayor frecuencia.

Se cuenta para este trabajo con registros de dos eventos que fueron detectados en sitios de la Ciudad de Salta. Tomando los mismos como sismos objetivos se generan registros artificiales que posean propiedades dinámicas similares para asegurar que el potencial destructivo del mismo sea el esperado en el sitio.

El modelo de generación que se utiliza en este trabajo, intenta reproducir la no estacionariedad propia de los movimientos sísmicos tanto en el campo del tiempo como de la frecuencia. Para ello, se considera el movimiento del suelo como constituido de varios componentes uniformemente modulados. Esta metodología fue utilizada entre otros, por [Der Kiureghian y Crempien, \(1989\)](#) y [Carli y Faravelli \(Carli, 1992\)](#). También en esta línea se inscribe la propuesta de [Saragoni y Hart, \(1974\)](#), con la diferencia que en el modelo de Saragoni se discretiza el movimiento en el dominio del tiempo mientras que en el modelo acá utilizado, la discretización se realiza en el campo de la frecuencia, por lo que presenta continuidad temporal.

## 2 BASES CONCEPTUALES

La aceleración del suelo  $a(t)$  debido a un movimiento sísmico, se representa mediante la sumatoria de  $k$  procesos uniformemente modulados,  $\ddot{x}_{ne_k}$  correspondientes a las bandas consideradas en el campo de las frecuencias. Luego

$$a(t) = \sum_k \ddot{x}_{ne_k}(t) \quad (1)$$

y el proceso uniformemente modulado se define

$$\ddot{x}_{ne_k}(t) = \varphi_k(t) \ddot{x}_{e_k}(t) \quad (2)$$

por lo que la aceleración del suelo es

$$a(t) = \sum_k \varphi_k(t) \ddot{x}_{e_k}(t) \quad (3)$$

donde  $\ddot{x}_{e_k}(t)$  define un proceso estacionario en cada banda de frecuencia.

En la expresión (3),  $\varphi(t)$  son funciones de modulación en función del tiempo, y  $\ddot{x}_e(t)$  son procesos estacionarios, estadísticamente independientes, Gaussianos, de media nula y varianza unitaria. Un proceso estacionario puede ser representado por la conocida expresión:

$$\ddot{x}_e(t) = \sum_{i=1}^n 2\sqrt{S(\omega)\Delta\omega} \cos(\omega_i t + \phi_i) \quad (4)$$

Por otro lado, los dos primeros momentos del proceso no estacionario representado por la expresión (3) son

$$E[a(t)] = \sum_k \varphi_k(t) E[\ddot{x}_e(t)] = 0 \quad (5)$$

pues  $E[\ddot{x}_e(t)] = 0$ .

$$E[a(t_1)a(t_2)] = \sum_k \varphi_k(t_1)\varphi_k(t_2) E[\ddot{x}_e(t_1)\ddot{x}_e(t_2)] \quad (6)$$

En el caso en que  $t_1 = t_2 = t$  se tiene que

$$E[a^2(t)] = \sum_k \varphi_k^2(t) \quad (7)$$

ya que  $E[\ddot{x}_e(t_i)\ddot{x}_e(t_j)] = \delta_{ij}$  (varianza unitaria).

Usando la relación de Wiener - Khintchine, se tiene también para  $t_1 = t_2 = t$  que

$$E[a^2(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} \sum_k \varphi_k^2(t) S_k(\omega) \quad (8)$$

de lo que se deduce que el espectro evolutivo para el proceso  $a(t)$  es

$$S(t, \omega) = \sum_k \varphi_k^2(t) S_k(\omega) \quad (9)$$

La evolución se materializa mediante la elección de intervalos no superpuestos de frecuencias, y en cada uno de ellos, se determina una función de densidad espectral de potencia (FDEP) no nula, de tal modo que el producto de la misma por el cuadrado de la función de modulación para la banda representa la contribución de ese intervalo al valor cuadrático medio del proceso.

### 3 FUNCIÓN DENSIDAD ESPECTRAL DE POTENCIA

Se experimentó numéricamente con varias funciones de densidad espectral de potencia (FDEP), partiendo de una simple función constante, utilizada para simular sismos chilenos de subducción y los del oeste norteamericano (Der Kiureghian y Crempien, 1989; Crempien y Araneda, 1993). Para una mejor simulación de los sismos argentinos que son producidos por deslizamientos de fallas corticales, en este trabajo se propone una FDEP que incorpora el espectro de Boore.

#### 3.1 Función densidad espectral de potencia de un proceso no estacionario

El desarrollo que sigue a continuación se refiere a cada banda de frecuencia por lo que se obviará en lo sucesivo el subíndice  $k$ .

La relación entre la FDEP y la transformada finita de Fourier de un proceso estacionario,

se expresa como:

$$S(\omega) = \lim_{t_f \rightarrow \infty} \frac{1}{2\pi t_f} E \left[ \left| \ddot{X}_e(\omega, t_f) \right|^2 \right] \quad (10)$$

donde  $\ddot{X}_e(\omega, t_f)$  es la transformada finita de Fourier del proceso estacionario. Se puede definir la transformada finita evolutiva del proceso uniformemente modulado como

$$A(\omega, t, t_f) = \varphi(t) \ddot{X}_e(\omega, t_f) \quad (11)$$

Conceptualmente el espectro evolutivo es el espectro del proceso estacionario modulado por una función del tiempo y la frecuencia

$$S_{ne}(t, \omega) = |\psi(t, \omega)|^2 S_{\ddot{x}_e}(\omega) \quad (12)$$

que comparando con la expresión (10) permite obtener una expresión para la FDEP del proceso uniformemente modulado.

$$S_{\ddot{x}_{ne}} = \lim_{t_f \rightarrow \infty} E \left[ \left| \ddot{X}_{ne}(\omega, t, t_f) \right|^2 \right] \quad (13)$$

### 3.2 Incorporación del espectro de Boore

El espectro de fuente radiado propuesto por [Boore \(1986\)](#), se expresa como:

$$S_a(\omega) = C S_1(\omega) S_2(\omega) S_3(\omega) \quad (14)$$

donde  $C$  es un factor de escala que se expresa como

$$C = \frac{R_\phi F V}{4\pi\rho\beta^3} \left( \frac{1}{R} \right) \quad (15)$$

$R_\phi$  expresa la forma de radiación,  $F$  mide los efectos de superficie,  $V$  tiene en cuenta el reparto de la energía en componentes horizontales,  $R$  es la distancia hipocentral,  $\rho$  mide la densidad, y  $\beta$  es la velocidad de las ondas de corte en la zona de generación del sismo.

$S_1(\omega)$  es el espectro de fuente, cuya expresión más usada es la de [Brune \(1970\)](#):

$$S_1(\omega) = M_0 \frac{\omega^2}{1 + \left( \frac{\omega}{\omega_c} \right)^2} \quad (16)$$

donde  $M_0$  es el momento sísmico y  $\omega_c$  es la frecuencia esquina en la fuente.

$S_2(\omega)$  tiene en cuenta la amplificación del movimiento debido al fuerte contraste entre las impedancias de las capas o debido a la menor resistencia que oponen a las ondas sísmicas a medida que se aproximan a la superficie. Se adoptó para este término una expresión aproximada que tiene en cuenta la amplificación debido a la segunda causa enumerada, y no depende de la frecuencia, sino de las condiciones locales del suelo.

$$S_2 = \sqrt{\frac{\rho_0 \beta_0}{\rho_s \beta_s}} \quad (17)$$

$S_3(\omega)$  es el factor de atenuación que puede expresarse como:

$$S_3(\omega) = F(\omega, \omega_m) \exp\left(-\frac{\omega R}{2Q\beta}\right) \quad (18)$$

donde  $Q$  es el factor de atenuación, que se supone constante en este estudio, a pesar que algunos estudios demuestran que depende de la frecuencia.  $F(\omega, \omega_m)$  es un filtro que tiene en cuenta la súbita caída que exhibe el espectro de aceleración para frecuencias superiores a un valor determinado. Se atribuye este fenómeno a una atenuación de campo cercano, pero lo más probable es que se deba a ambos efectos. Este fenómeno trunca la porción de altas frecuencias del espectro y es la causa de la naturaleza de banda limitada del modelo estocástico.

Hanks (1982) propuso un filtro Butterworth pasa baja no causal, con una frecuencia esquina característica  $\omega_m$  dependiente de las condiciones de sitio, por lo que se la puede considerar independiente del momento sísmico y que se utiliza en este trabajo.

$$F(\omega, \omega_m) = \left[1 + \left(\frac{\omega}{\omega_m}\right)^8\right]^{-1/2} \quad (19)$$

A fin de usar estas expresiones para predecir futuros sismos, es preciso relacionar los parámetros anteriores a una medida del sismo, como por ejemplo el momento sísmico  $M_0$ . La relación entre la frecuencia esquina y el momento sísmico es (Brune, 1970)

$$f_c = \frac{\omega_c}{2\pi} = 4.9 \times 10^6 \beta \left(\frac{\Delta\sigma}{M_0}\right)^{1/3} \quad (20)$$

donde  $\Delta\sigma$  es la caída de tensión dinámica.

Considerando que el cuadrado del espectro de Boore es el promedio temporal del valor esperado del cuadrado de la transformada finita de Fourier del proceso uniformemente modulado, o sea

$$A_a^2(\omega) = \left\langle E \left[ \left| \ddot{X}_{ne}(\omega, t, t_f) \right|^2 \right] \right\rangle = \lim_{t_f \rightarrow \infty} \frac{1}{t_f} \int_{-\infty}^{\infty} E \left[ \left| \ddot{X}_{ne}(\omega, t, t_f) \right|^2 \right] dt \quad (21)$$

como ya se acotó antes, el proceso estocástico estacionario tiene varianza unitaria. Recurriendo a la intensidad  $I$  que se define como: (Quek et al., 1990)

$$I = \int_0^{\infty} \sigma_{ne}(t) dt = \int_0^{\infty} |\varphi(t)|^2 dt \quad (22)$$

se deducen las expresiones para los procesos estacionario y no estacionario en cada banda de frecuencia:

$$S_{\ddot{x}_e}(\omega) = \frac{1}{2\pi I} A_a^2(\omega) \quad (23)$$

$$S_{\ddot{x}_{ne}}(\omega, t) = \frac{1}{2\pi I} A_a^2(\omega) \varphi^2(t) \quad (24)$$

#### 4 FUNCIÓN DE MODULACIÓN

A los fines de modular las amplitudes de los acelerogramas simulados se hicieron varias propuestas, comenzando con la más simple que es considerar un pulso rectangular, de duración  $t_f$ . En este trabajo de investigación se probaron varias funciones, a fin de reproducir del mejor modo posible los registros muestras. En la determinación de los parámetros que las definen se usaron también distintos métodos, pero que pueden resumirse en dos estrategias metodológicas: estimación de parámetros en función de los momentos del registro objetivo y técnicas de ajuste no lineal

Dos de las funciones más usadas para procesos de simulación son la función beta, usada por primera vez por [Arias et al. \(1976\)](#), y la función gamma. [Saragoni \(1976\)](#), demostró que si se considera el terremoto como un proceso resultante de someter un proceso original a una serie de filtros, cuando el número de filtros es suficientemente grande, el valor cuadrático medio del proceso tiende a la función gamma también llamada chi-cuadrada en la literatura. Las funciones mencionadas se definen respectivamente como:

$$\text{Función beta: } \varphi^2(t) = \alpha \left( \frac{t}{t_f} \right)^\beta \left( 1 - \frac{t}{t_f} \right)^\gamma; \quad \text{función gamma: } \varphi^2(t) = \alpha t^\beta e^{-\gamma t} \quad (25)$$

La aplicación de las funciones beta y gamma en su formulación tradicional (25) como el uso de los momentos espectrales para la determinación de los parámetros que las definen no condujeron a resultados satisfactorios para los registros correspondientes a la zonas cuyana ni noroeste argentino. Se formularon varias nuevas propuestas ([Orosco, 2004](#)) de las que se muestran las que condujeron a los mejores resultados para la base de datos de sismos argentinos:

$$\varphi^2(t) = \alpha \left( \frac{t-t_0}{t_f-t_0} \right)^\beta \left( 1 - \frac{t-t_0}{t_f-t_0} \right)^\gamma + \delta \quad (26)$$

$$\varphi^2(t) = \alpha (t-t_0)^\beta e^{-\gamma(t-t_0)} + \delta \quad (27)$$

Como se aprecia, las funciones (26) y (27) son respectivamente, las funciones beta y gamma modificadas por dos parámetros; en primer lugar, se modificó la variable tiempo  $t$  con un parámetro  $t_0$ , que tiene en cuenta el instante en que irrumpe el pulso sísmico, pues la mayoría de los registros de la base de datos presentan una apariencia impulsiva; en segundo lugar, se agregó un parámetro  $\delta$  a fin de considerar el nivel de ruido y los errores propios de los datos con que normalmente se cuenta. Para la determinación de los parámetros en cada franja, se hace un ajuste no lineal, utilizando el algoritmo de Levenberg - Marquardt, ([Press et al., 1992](#)). La determinación del parámetro  $t_0$  a partir del cual se construye la función de modulación, hace uso del método de Brent de minimización ([Press et al., 1992](#)). Es de hacer notar, que en el proceso de optimización es necesario acotar los parámetros a valores reales no negativos, a excepción del parámetro  $t_0$ , pues de ese modo se asegura una muy buena convergencia y se prescinde de cuidados especiales al dar los valores iniciales, lo que aumenta la eficacia y bondad del método propuesto.

La función gamma modificada demostró ser adecuada para simular los sismos de Mendoza '85 y en general los cuyanos así como algunos del oeste de Estados Unidos; mientras que la función beta modificada es apropiada para sismos registrados en el centro de la Ciudad de

Salta.

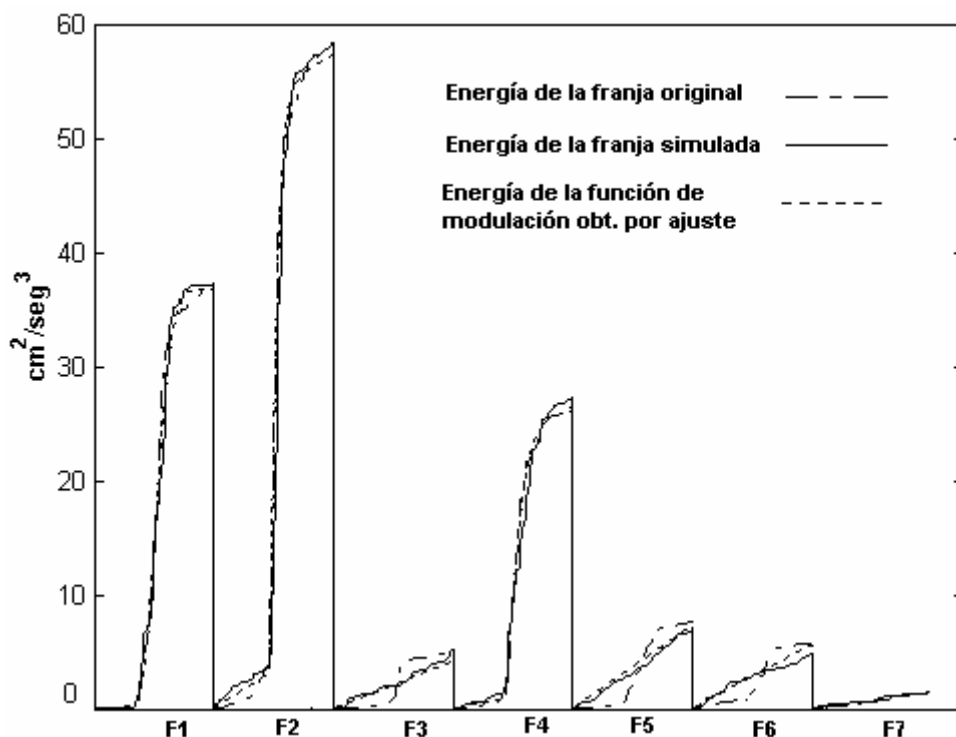


Figura 1: Distribución de la energía en cada una de las franjas para A99LO

Las figuras 1, 2 y 3, son ejemplos para el caso de la Ciudad de Salta. En la primera mencionada se observa la evolución en el tiempo de la energía en cada una de las siete franjas (F1 a F7) en que se dividió el registro en el campo frecuencial. La duración de cada banda es la del registro original. Como se observa, tres franjas (primera, segunda y cuarta) acumulan la mayor parte de la energía y en ellas el ajuste resultó muy bueno. Se deberían haber puesto más estrictas las condiciones de las iteraciones para las restantes, pero en vista de que su aporte a la energía del proceso no es significativo, se relajó este requisito. En las figuras 2 y 3 se pueden apreciar la primera y segunda franja respectivamente en el campo temporal y la función de amplitud obtenida mediante ajuste no lineal para cada caso. Se minimiza la diferencia entre la energía de la franja y la de la función de amplitud propuesta.

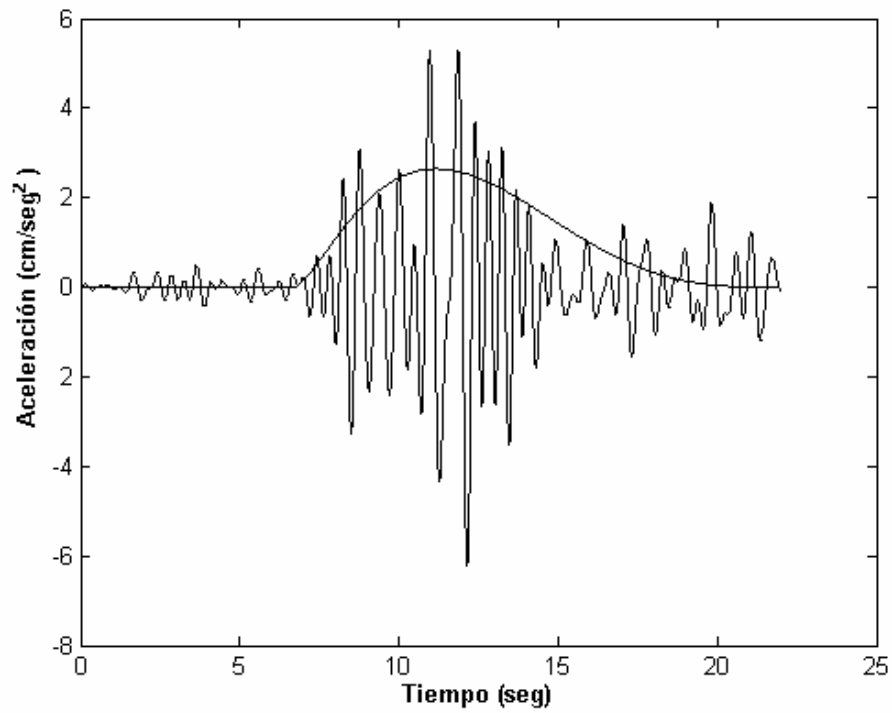


Figura 2: Primera franja de A99LO y la función ajustada.

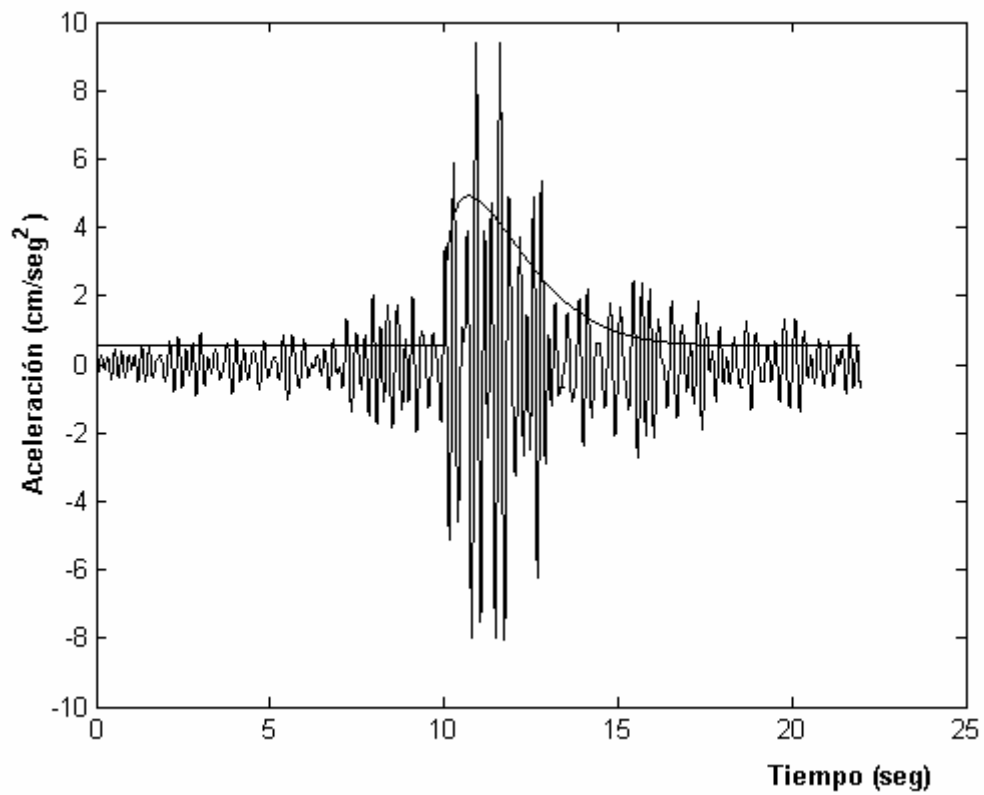


Figura 3: Segunda franja de A99LO y la función ajustada



## 5 FRANJAS EN EL CAMPO FRECUENCIAL

Otro punto que se debe considerar en la aplicación de este modelo es el número de franjas y el criterio con el que se discretizará el movimiento en el campo frecuencial. Der Kiureghian y Crempien (1989), realizaron el estudio de acelerogramas registrados en la costa oeste de Norteamérica dividiendo el espectro de potencia en partes iguales, llegando a la conclusión que un máximo de 9 franjas eran suficientes para reproducir las principales características de los registros muestras. Se definirá este criterio como el de "bandas iguales".

Luego, Crempien y Araneda (1993), dividieron el espectro en tres partes, las que se definen de acuerdo a los momentos de orden 0, 1 y 2 del registro que representan el área bajo la curva, el baricentro y el radio de giro o dispersión, respectivamente de la distribución de la energía del proceso en el tiempo. Aplicaron este método (que será llamado "de los momentos") con resultados satisfactorios para la simulación de sismos chilenos (de subducción). Pugliese y Sabetta (1994), entre otros, también usaron estos conceptos en la construcción de su modelo, que aplicaron a registros obtenidos en Italia.

Usando los dos criterios antes expuestos, no se obtuvieron buenos resultados para la mayoría de los registros muestras. Por ello se hicieron otras consideraciones en el proceso de definir las bandas frecuenciales, buscando mejorar los resultados obtenidos. El criterio de división que dio los mejores resultados surge de considerar los distintos "paquetes" de energía en que se presenta el espectro de Fourier, considerando cada uno de ellos como el intervalo que media entre dos valores "casi nulos" del mismo.

Para los registros del sismo de Mendoza '85, se observó una relación entre el número de bandas y el factor de Vanmarcke (1980). Así, para acelerogramas con valores del factor de Vanmarcke menores o cercanos a 0.66 (registros con espectros de banda ancha), la división en cinco franjas es la que dio mejores resultados. Para registros de banda angosta (valores del factor de Vanmarcke mayores que 0.66) la división adecuada para la simulación resultó ser de tres franjas (Orosco, 2004).

En el caso de los registros salteños, tanto los de banda ancha como los dos únicos de banda angosta fueron simulados con más de cinco franjas: 7 y 13 franjas, para el caso de sismos de banda ancha y 8 para los de banda angosta. Dada la exigua cantidad de datos no es posible aún inferir ninguna característica dominante.

## 6 REGISTROS SIMULADOS

Los acelerogramas registrados en la ciudad de Salta con que se cuentan para este estudio, se detallan en la Tabla 1.

Evento	Características	Registro	$A_{\max}$ (cm/seg <sup>2</sup> )	$\delta$	$t_d$ / $t_f$ (seg)
Tilcara '99	M: 5,5 H: 21 km R: 153,95 km	A99LO	16,70	0,58	15,21 / 22
		A99TR	14,20	0,58	14,52 / 22
		M99LO	19,00	0,76	17,08 / 24
		M99TR	12,70	0,84	16,54 / 24
San Pedro 2001	M:4,1 H:33 km R: 96 km	SPLO	15,30	0,53	14,00 / 20
		SPTR	5,20	0,55	15,27 / 20

Tabla 1: Características dinámicas más importantes de los sismos "objetivo" utilizados en este estudio.

Como se observa en la [Tabla 1](#) los registros corresponden a dos sismos con origen en la vecina Provincia de Jujuy. En la segunda columna se resume la información de los mismos, donde  $M$  es la magnitud reportada por el Instituto Nacional de Prevención Sísmica,  $H$  es la profundidad y  $R$  la distancia hipocentral. En las columnas 4, 5 y 6 se detallan las principales características dinámicas básicas, como ser el valor pico de la aceleración, el factor de Vanmarcke y la duración efectiva, respectivamente. Ésta última es entendida como el tiempo en que el 90% de la energía es entregada por el sismo; en la columna correspondiente puede apreciarse la duración efectiva ( $t_e$ ) y la duración total del acelerograma ( $t_f$ ).

Según la clasificación de los registros dada por el valor del factor de Vanmarcke se tiene que sólo M99LO y M99TR (componentes longitudinal y transversal del registro tomado en el sitio “Ministerio” de la Ciudad de Salta), es de banda angosta. Los demás corresponden al sitio “AGAS” y son de banda ancha.

Se reportan los resultados obtenidos para las componentes longitudinales de los tres registros, por ser las más intensas.

Las frecuencias esquina y máxima, con las que se diseña el espectro de Boore, corresponden al comienzo y fin del plafón que el espectro de amplitudes de Fourier posee al ser representado en escala logarítmica. Aplicando la ecuación (20) se determinaron los parámetros con los que se ha diseñado el espectro de amplitudes de Boore.

Para el sismo de Tilcara '99, se obtuvo:  $f_c = 1.0$  Hz y una frecuencia  $f_m = 10$  Hz para A99LO y 8 para M99LO,  $M_0 = 2.00e+18$  N-m, resultando una caída de tensión de  $0.4e+8$  N/m<sup>2</sup>; se consideró un coeficiente  $Q$  constante e igual a 200 ([Orosco, 2004](#)).

En cuanto al sismo de San Pedro, los respectivos valores son:  $f_c = 2.0$  Hz,  $f_m = 10$  Hz (mismo sitio que A99LO),  $M_0 = 1,585e+15$  N-m y  $\Delta\sigma = 2,513e+6$  N/m<sup>2</sup>

Ambos sitios tienen suelos superficiales blandos por ello, en base a estudios de suelos, se determinó para el sitio “Ministerio” una densidad de  $1.900$  kg/m<sup>3</sup> y una velocidad de onda de corte de  $137$  m/seg; para el sitio “AGAS”, los valores correspondientes son  $1.929$  kg/m<sup>3</sup> y  $143$  m/seg, respectivamente.

Aplicando los conceptos básicos desarrollados en párrafos anteriores se desarrolló el código **GENERA** (ver [ANEXO](#)) con el que se obtuvieron muestras de acelerogramas artificiales tomando los registros detallados en [Tabla 1](#) como “objetivos”. Como se aprecia en las seis figuras que siguen, reproducen bien las características tanto en el campo del tiempo como en el de las frecuencias (o períodos). Para cotejar el comportamiento en el tiempo se muestran los acelerogramas originales y algunas simulaciones. En el caso de su desarrollo frecuencial, se adoptó para comparar el espectro de respuesta, pues la norma sismorresistente en vigencia en Argentina define la acción sísmica por medio de espectros de diseño y es un parámetro que resulta familiar al proyectista.

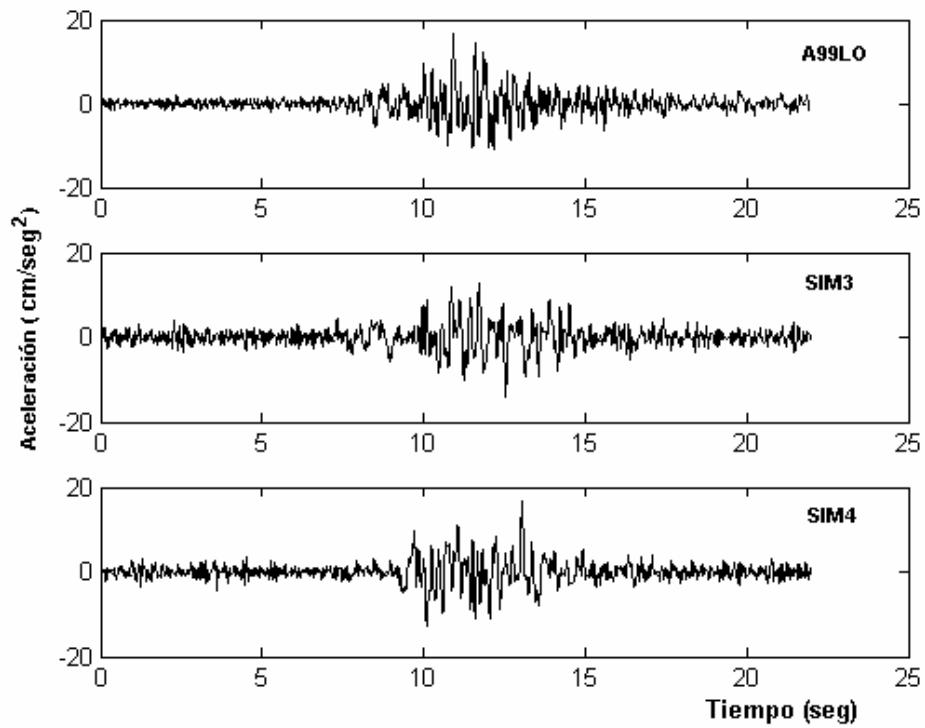


Figura 4: Registro A99LO y dos simulaciones

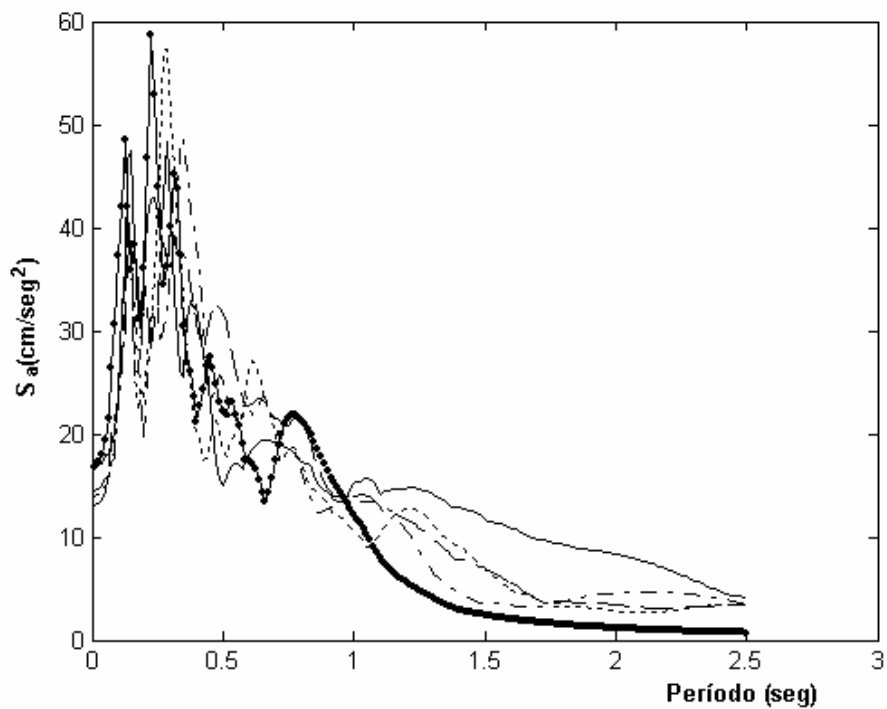


Figura 5: Espectros de respuesta elásticos de A99LO y 4 simulaciones

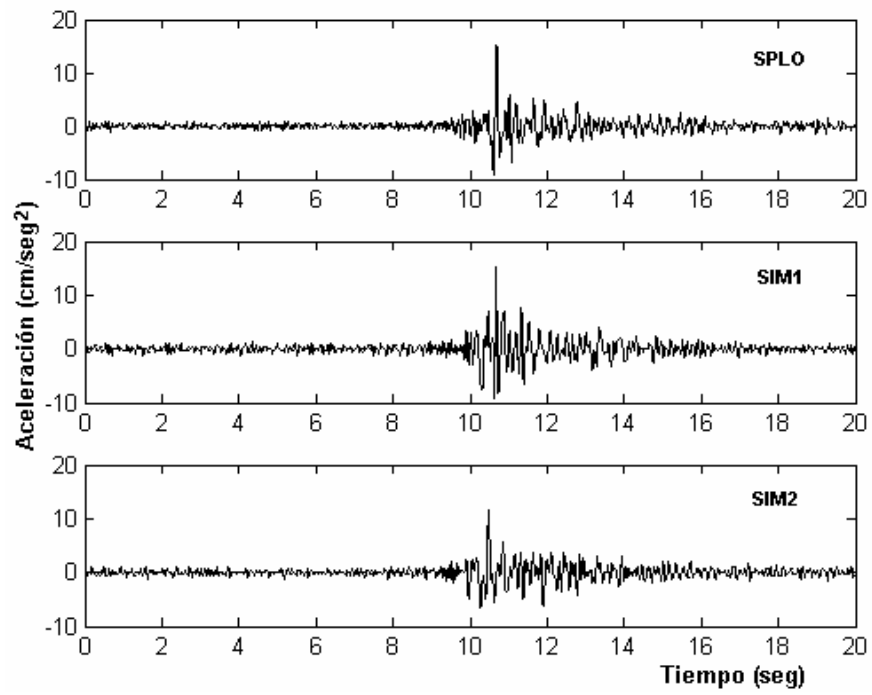


Figura 6: Registro SPLO y dos simulaciones

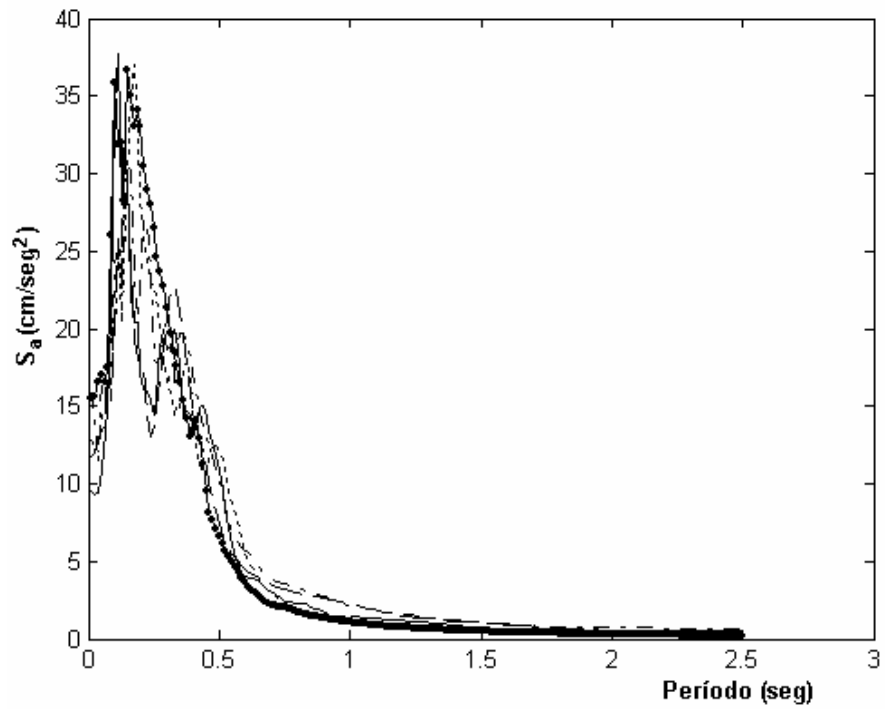


Figura 7: Espectro de respuesta de SPLO y simulaciones

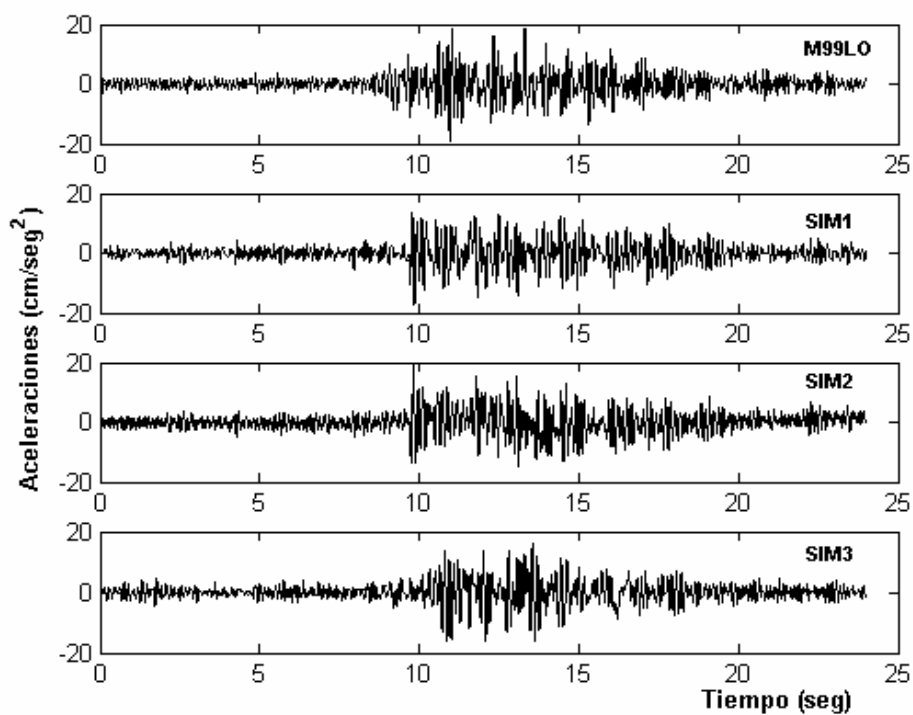


Figura 8: Registros M99LO y tres simulaciones

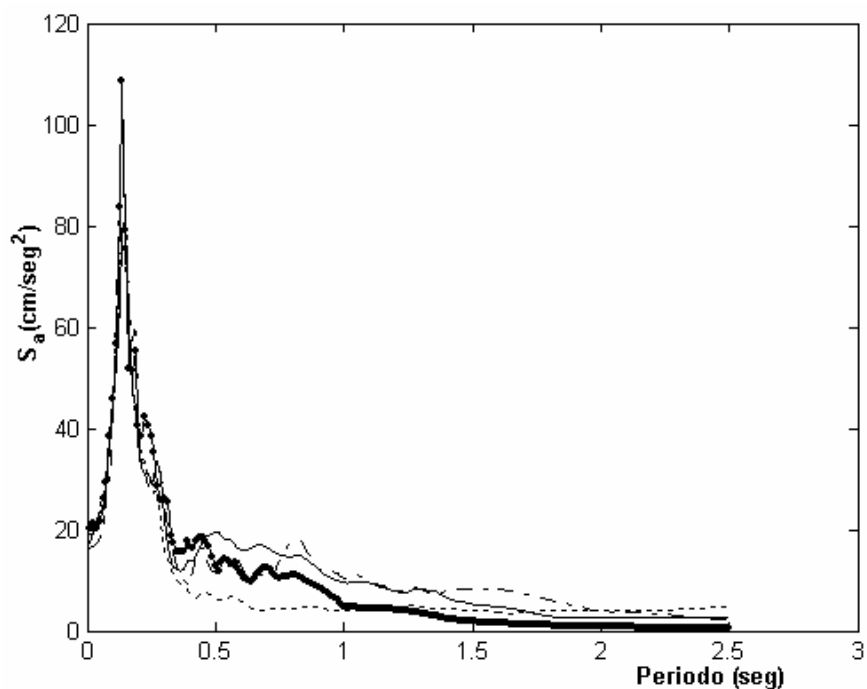


Figura 9: Espectro de respuesta de M99LO y simulaciones

En las figuras que representan el espectro de aceleraciones, el correspondiente al registro real, en cada caso, es el que presenta una línea y círculos.

### 6.1 Simulación de sismos intensos

El modelo se aplicó también a la generación de sismos intensos como los registrados

durante el sismo de Caucete '77 de 7.4 grados y Loma Prieta '89 entre otros (Orosco, 2004).

En este trabajo, los registros objetivos y por ende las muestras simuladas corresponden a sismos de poca magnitud. Al momento de la realización de este informe no se cuenta con registros de sismos intensos originados en las mismas fuentes que los registrados en la Ciudad de Salta.

Por ello se muestran los resultados de las simulaciones correspondientes a un sismo de pequeña intensidad ocurrido en España (Andalucía, 1984) aplicando el modelo acá expuesto, y su posterior utilización para generar espectros de respuesta correspondientes a un evento más importante.

El acelerograma objetivo en este ejemplo (SFLO), es la componente longitudinal de los acelerogramas registrados en Santa Fe. Se cuenta con datos de fuente por lo que la función de densidad espectral de potencia incluye el espectro de Boore y fue estimado con los siguientes valores (Morales et al., 1996):

Magnitud: 5

Distancia epicentral: 40.4 km

Profundidad: 12 km

Momento sísmico:  $3 \cdot 10^{16}$  N-m

Caída de tensión:  $0.100 \cdot 10^8$  N/m<sup>2</sup>

Frecuencia máxima: 25 Hz

Coefficiente de atenuación dependiente de la frecuencia:  $80 f^{0.65}$

En las figuras 10 y 11, las muestras SIM1 y SIM3 se obtuvieron considerando una función tipo gamma en cada franja (se dividió en tres franjas), obtenidas mediante ajuste no lineal, mientras que para SIM2 se utilizó la resolución de las fórmulas cerradas en función de los momentos del registro para obtener la función gamma tradicional (Orosco, 2004).

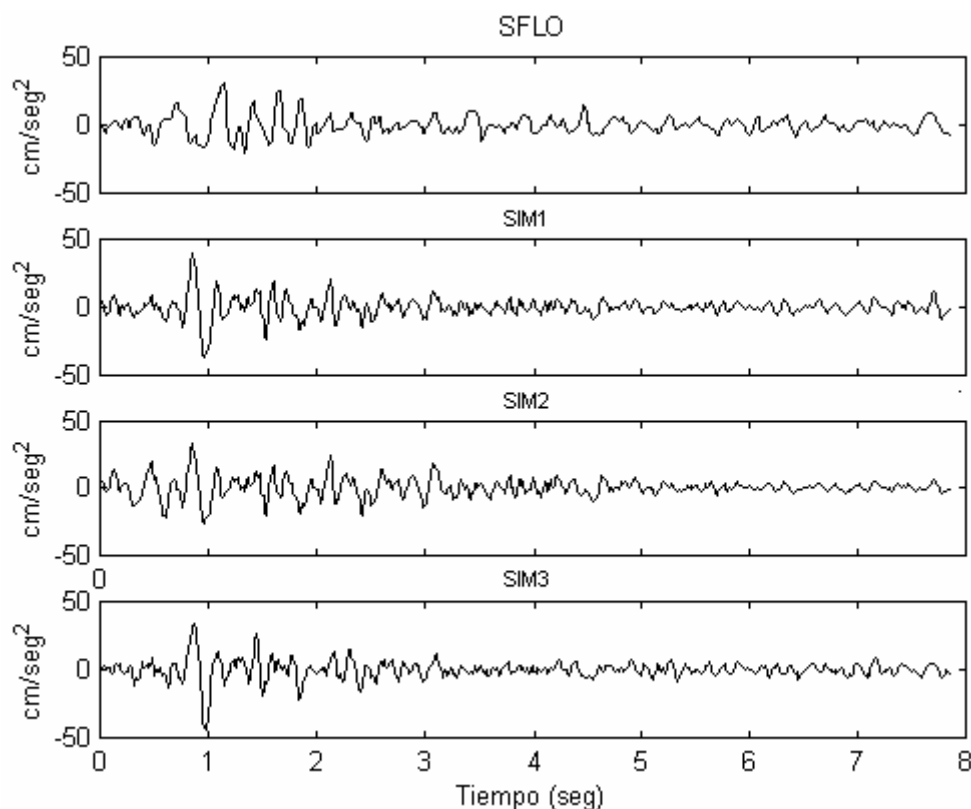


Figura 10: Registro SFLO y tres simulaciones

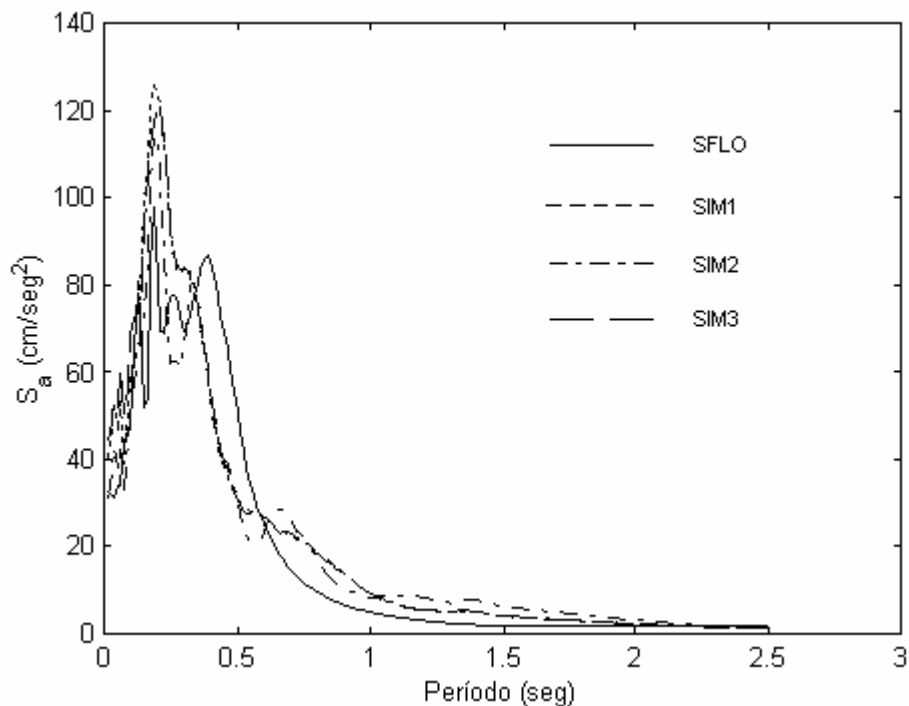


Figura 11: Espectros de respuesta elástico de SFLO y simulaciones

Por datos de la sismicidad histórica se sabe que es posible de ocurrir en un lugar cercano a Santa Fe (donde fue registrado el acelerograma SFLO) un sismo de magnitud 7. (Morales et al. (1996) simularon historias correspondientes a tal evento tomando el registro SFLO y otros del terremoto de 1984, como funciones de Green empíricas. Haciendo uso de los modelos propuestos en este trabajo de investigación se generan registros correspondientes a tal evento posible y se comparan los resultados.

En primer lugar, se usa el sismo SFLO normalizado como muestra para determinar los parámetros que definen las funciones de amplitud en cada franja (se consideran tres franjas frecuenciales, como en el registro original) y se diseña la función de densidad espectral de potencia con los datos del sismo hipotético de magnitud 7, considerando la misma caída de tensión que para el registro original SFLO (Morales et al., 1996). Como se sabe que pueden registrarse aceleraciones máximas de entre 200 y 300 gals, se escala la historia obtenida a esos valores. Los resultados en términos de espectro de respuesta elástica se comparan en la figura 12. El señalado como “Función de Green” es el obtenido por los autores mencionados; el identificado como Modelo A es el resultado logrado con el modelo utilizado en este trabajo y SFLO es el original con que se cuenta. Como el espectro de respuesta no es sensible a la duración del sismo, es posible generar espectros probables de ocurrir durante eventos sísmicos intensos para aquellos sitios donde se cuenta con registros de eventos pequeños o moderados, y para terremotos originados en la misma fuente sismogénica que los mismos. Las historias generadas no son apropiadas para el análisis estructural pues tendrán la misma duración que el sismo objetivo (pequeño) lo que no está de acuerdo con la realidad del fenómeno sísmico.

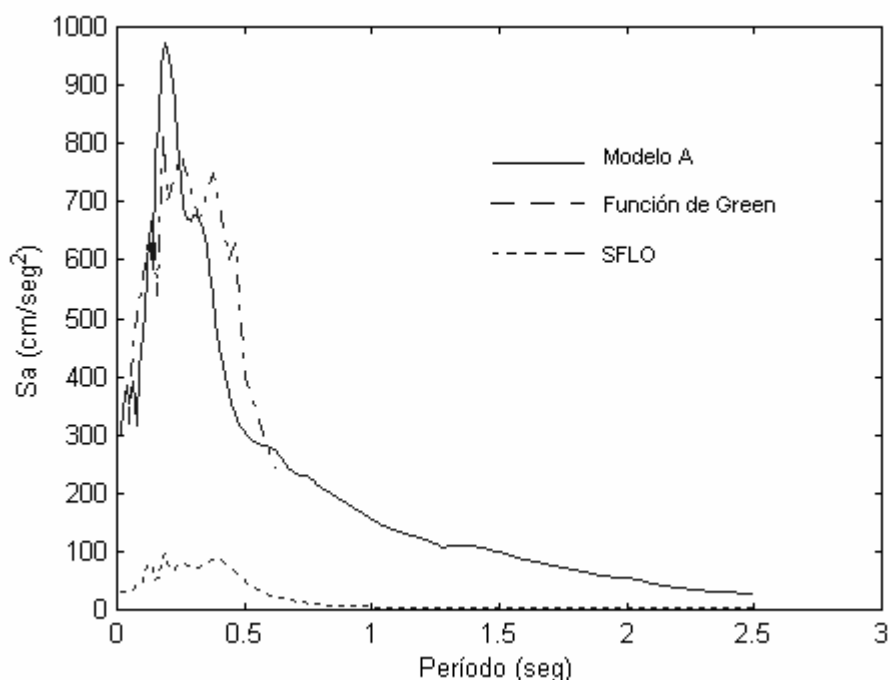


Figura 12: Espectros de respuesta para un sismo intenso (M=7) obtenido a partir de SFLO

Para la zona cuyana argentina, se ha desarrollado un modelo que permite generar muestras de un posible sismo intenso, basado en el modelo que acá se explica, pero diferente en cuanto a la manera de determinar las funciones envolventes sobre todo ya que están basadas en un proceso de regresión (Orosco, 2004, Orosco et al., 2005).

## 7 CONCLUSIONES

Los aspectos fundamentales en que se funda el modelo de simulación son: el diseño de la función de modulación temporal de amplitud, el diseño de la función densidad espectral de potencia, y el criterio de división en bandas en el campo frecuencial.

Con respecto a la primera se experimentó con varias propuestas, obteniéndose los mejores resultados para sismos registrados en la Ciudad de Salta con una función tipo beta modificada, determinándose los cinco parámetros mediante ajuste no lineal.

No se cuenta con sismos impulsivos de banda angosta de campo cercano, que en el caso de la zona cuyana pudieron ser simulados muy bien dividiendo el espectro de Fourier en tres bandas. Para tal región, en el caso de sismos de fuente lejana (más de 50 km) la división en cinco bandas fue la adecuada. Para el caso de Salta sólo se cuenta con registros de campo lejano y en todos los casos se debió recurrir a la división en el campo frecuencial en siete o más franjas.

En cuanto a la función densidad espectral de potencia que se define en cada banda frecuencial para el cálculo del proceso uniformemente modulado, incluye en su definición datos de fuente, paso y sitio en una forma simple por medio del espectro de Boore, ampliamente utilizado en Ingeniería Sísmica. Los resultados para el caso de Salta también son considerablemente mejores cuando se incluye el espectro de Boore en la definición de la función de densidad espectral de potencia.

La convergencia del proceso de ajuste no lineal, base de la bondad del modelo, es rápida por lo que el tiempo de computación es pequeño.

Las señales generadas muestran una buena correlación con el registro cuyas propiedades tienen por objetivo reproducir.



En el caso de contarse con al menos un registro para cada sitio de un sismo intenso, el modelo permite generar muestras de procesos aleatorios para su aplicación al campo estructural, como ser en el análisis dinámico no lineal de edificios, estudios de licuefacción, estudios de vulnerabilidad, estudios de microzonificación, etc.

También puede servir de base a la utilización de otros modelos de generación, ya que muestras de sismos pequeños generados aleatoriamente pueden ser utilizados como funciones de Green, para la generación de sismos más intensos; este es el paso a seguir en este trabajo de investigación.

## AGRADECIMIENTOS

Al Ingeniero Alejandro Giuliano, Director del Instituto Nacional de Prevención Sísmica por su buena disponibilidad para facilitar los registros que fueron utilizados en este estudio.

## ANEXO

En este apartado se explican algunos detalles del proceso numérico utilizado en el código **GENERA** que permite la simulación de acelerogramas.

La función que se ajusta es:

$$I(T; \mathbf{a}) = \int_0^T g(t; \mathbf{a}) dt = \sum_{i=0}^N \frac{g(t_{i+1}; \mathbf{a}) - g(t_i; \mathbf{a})}{2} h \quad (28)$$

donde  $g(t; \mathbf{a})$  es la función de amplitud (tipos gamma y beta en este trabajo). La función mérito es:

$$\chi^2(\mathbf{a}) = \sum_{i=1}^N [I_i - I(T_i; \mathbf{a})]^2 \quad (29)$$

en la que  $I_i$  es la energía del proceso hasta el momento  $T_i$ . Debido a que el conjunto de parámetros incluye el tiempo  $t_0$  el modelo no convergía muy bien con método de Levenberg-Marquardt. Por lo tanto en vez de la expresión (29) se utilizó como función mérito:

$$\chi^2(\mathbf{a}(t)) = \sum_{i=1}^N [I_i - I(T_i; \mathbf{a}(t))]^2 \quad (30)$$

Ahora la función mérito (30) se minimiza mediante el método de Levenberg-Marquardt en cada instante  $t$  y esta variable  $t$  se minimiza utilizando el método de Brent, del siguiente modo:

$$\chi^2(\mathbf{a}_0(t_0)) = \min_{t_1 \rightarrow t_0} \left( \min_{\mathbf{a}(t_1) \rightarrow \mathbf{a}_0(t_1)} \chi^2(\mathbf{a}(t_1)) \right) \quad (31)$$

El proceso de minimización tiene aún el problema de la oscilación de los parámetros. Esto sucede cuando uno o más parámetros se aproximan a cero. Como ejemplo, para el modelo de función de amplitud del tipo

$$g(t; \mathbf{a}(t_1)) = a_0(t - t_1)^{a_1} e^{-a_2(t - t_1)} + a_3 \quad (32)$$

Se asume que todos los parámetros  $a_0$ ,  $a_1$  y  $a_2$  son positivos, aunque el método de Levenberg-Marquardt no lo hace. Puede ser que el parámetro  $a_2$  tome valores positivos o negativos; de darse esta situación, de la ecuación (32) se puede observar que la forma de la

función es completamente diferente, dependiendo de si el parámetro  $a_2$  es negativo o positivo. Debido a esto la función (30) converge muy lentamente, pero lo hace. Y el resultado podría incluir valores negativos, dependiendo cuando se dé por terminado el proceso de minimización.

Para solucionar este problema, se modificó el método de Levenberg-Marquardt de tal manera que se manejen sólo valores positivos, por lo que para el ejemplo de ecuación (32) se tiene:

$$g(t; \bar{\mathbf{a}}(t_0)) = |a_0| (t - t_0)^{|a_1|} e^{-|a_2|(t - t_0)} + |a_3| \quad (33)$$

Estas modificaciones pueden realizarse fuera de las subrutinas pero en este trabajo se consideró más adecuado cambiar los parámetros a su valor absoluto dentro de la subrutina *mrqcof*, antes de realizar el lazo sumatorio sobre todos los pasos de tiempo. Se muestran las modificaciones de la subrutina *mrqcof* (Press et al, 1992, p.682):

```

      ...
      chisq=0.
C
C   Beginning of modification
C   Initialization of parameters
C
      ymod=0.
yprev=0.
      do 20 j=1,ma
          a(j)=abs(a(j))
          dyda(j)=0.
          dprev(j)=0.
20      enddo
      do 16 i=1,ndata
          call func(x(i),a,ynext,dnext,ma)
C
C   Integration
C
          do 21 j=1,ma
              dyda(j)=dyda(j)+h*(dprev(j)+dnext(j))/2.
              dprev(j)=dnext(j)
21      enddo
          ymod=ymod+h*(yprev+ynext)/2.
          yprev=ynext
C
C   Here the original subroutine continues
C
      sig2i=1./(sig(i)*sig(i))
      ...

```

Figura 13: Modificaciones de la subrutina *mrqcof*

Con estas modificaciones el algoritmo de minimización converge para todos los casos. Por ejemplo, para el caso de expresión (33) dando valores iniciales de  $a_1 = 2$ ,  $a_2 = 6$ ,  $a_3 = 0$  y  $a_0$  estimado de tal manera que (33) sea igual a la energía original.

En cuanto a los tiempos de procesamiento, el paso de discretización de las historias objetivo y simuladas es en todos los casos de 0.004 por lo que la frecuencia máxima de simulación fue de 125 Hz. Para el caso de A99LO, discretizado en 5.500 puntos y siete franjas frecuenciales, la simulación tomó 4 minutos, para M99LO, con 6.000 puntos y ocho franjas frecuenciales fue de 5 minutos y finalmente para simular SPLO, con 13 franjas y

5.000 puntos, el total del proceso de simulación llevó 7 minutos (Laptop con un procesador de 1.6 GHz).

## REFERENCIAS

- Araya, R. and Saragoni, G.R., Earthquake accelerogram destructiveness potential factor, *Proc. 8th World Conference on Earthquake Engng*, EERI, San Francisco, CA, pp 835 – 842, 1985
- Arias, A., Holzzapfel, A. and Saragoni G.R., An approximate expression for the mean square acceleration of earthquake ground motions, *Proc. 5<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, Roorkee, India, 1976
- Boore, D.M., Short period P and S waves radiation from large earthquakes: Implications for spectral relations, *BSSA*, Vol. 76, pp 43-64, 1986
- Brune, J.N., Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 75, pp 4997-5009, 1970
- Carli, F., Nonstationary models of earthquake accelerograms, *Proc. 10<sup>th</sup> World Conf. Earthq. Eng.*, Madrid, Spain, Vol. 2, pp 829-834, 1992
- Crempien, J. y Araneda, P., Simulación de Acelerogramas Consistentes con la Sismicidad Local, *Tesina de Habilitación Profesional*, Universidad de Concepción, Chile, 1993
- Der Kiureghian, A. and Crempien, J., An Evolutionary model for earthquake ground motion, *Structural Safety*, Vol. 6, pp 235 – 246, 1989
- Hanks, T.C,  $f_{max}$ ?, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 72, pp 1867—1879, 1982
- Morales, J., Singh, S.K. and Ordaz, M., Analysis of the Granada (Spain) earthquake of 24 June, 1984 (M=5) with emphasis on seismic hazard in the Granada Basin, *Tectonophysics* 257, pp 253-253.
- Orosco, L., Simulación de movimientos intensos para zonas con pocos registros y su aplicación a la evaluación del comportamiento de las estructuras, *Tesis doctoral*. Universidad Politécnica de Cataluña, 2004
- Orosco, L.; Haarala Orosco, M. y Barbat, A., Generación de acelerogramas artificiales compatibles con la sismicidad local. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, Quito (Ecuador). Vol. 10 – N° 1. pp 113 – 140, 2005.
- Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T. and Flannery, B.P, Numerical Recipes in FORTRAN, *2nd. Edition*, Cambridge University Press, Cambridge, 1992
- Pugliese, A., Sabetta, Simulation of nonstationary time histories scaled for magnitude, distance and soil conditions, *10th European Conference on Earthquake Engineering*, Vienna, Austria. Pp 247-256, 1994
- Quek, S., Teo, Y. and Balendra, T., Non - stationary structural response with evolutionary spectra using seismological input model, *Earthq. Eng. Struc. Dyn.*, Vol. 19, pp 275-288, 1990
- Saragoni, R. and Hart, G.C., Simulation of Artificial Earthquakes, *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, Vol. 2(3), pp 249 – 267, 1974
- Saragoni, G.R., El método  $\alpha, \beta, \gamma$  para la caracterización de los movimientos sísmicos, *Segundas Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica*, Papel A-1, Santiago, Chile, 1976
- Vanmarcke, E.H., Parameters of the spectral density function, their significance en the time and frequency domain, *MIT Civil Engineering and Design*, 60-1, 1980