

## Generación de acelerogramas artificiales compatibles con la sismicidad local

**Dra. Lía Orosco**<sup>38</sup>

*liaorosco@uolsinectis.com.ar*

**Dr. Mika Haarala Orosco**

*mhaarala@uolsinectis.com.ar*

**Dr. Alex Barbat**

*alex.barbat@upc.es*

### Resumen

Se presenta un modelo de generación de acelerogramas artificiales consistente con la sismicidad local de la región en estudio. En este estudio se contó principalmente con datos de la región cuyana argentina. En su formulación se hace uso del concepto de espectro evolutivo, donde la evolución en el campo frecuencial está materializado por una discretización del espectro de Amplitudes de Fourier, definiendo un proceso uniformemente modulado en cada franja.

La modulación en el campo temporal se hace mediante una función tipo gamma cuyos parámetros se determinan en función de los momentos temporales del registro, los que a su vez son estimados en base a una regresión lineal en función de la magnitud y la distancia epicentral; de esta manera se concreta la relación con la sismicidad local.

**Palabras claves:** procesos estocásticos – acelerogramas artificiales – función de modulación – regresión

---

<sup>38</sup> Lía Orosco es Doctora Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos por la Universidad Politécnica de Cataluña y docente de Ingeniería Civil en la Universidad Católica de Salta y la Universidad Nacional de Salta. Mika Haarala Orosco tiene una Maestría en Matemáticas de la Universidad de Joensuu (Finlandia) y trabaja en Acrenet Oy en el desarrollo de sistemas informáticos. El Dr. Ing. Alex Barbat es catedrático de la E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Cataluña (España).

## 1. Introducción

La República Argentina cuenta con una amplia zona adyacente a la Cordillera de los Andes con una actividad sísmica importante, evidenciada en las crónicas históricas y en los últimos años, en el catálogo instrumental. Se cuenta con algunos registros de sismos medianos y fuertes obtenidos principalmente en la zona cuyana, que es la de mayor actividad sísmica, pero ellos son todavía insuficientes para las aplicaciones que el cálculo estructural exige actualmente. Esta amplia área de la región oeste-central ha sido microzonificada, por lo que el conocimiento que en ella se tiene de las condiciones del suelo, tectónica y geomorfología, es más acabado que en otras regiones argentinas. Se están realizando también grandes esfuerzos para encarar estudios de la sismicidad en la Provincia de Salta, en el norte del país, que es la segunda zona de importancia considerando la peligrosidad sísmica, donde no se cuenta con ningún registro de sismos intensos, a pesar de que hay evidencias históricas de su ocurrencia.

Por ello el principal objetivo de este trabajo fue definir un modelo de generación de sismos artificiales basado en técnicas de regresión, probables de ocurrir en principio, en la región cuyana argentina, para ser aplicados al cálculo estructural, pero cuya metodología puede ser aplicada en cualquier región donde se tengan los datos adecuados.

## 2. Bases Conceptuales

Las distintas propuestas y estrategias para encarar la solución de esta problemática, pueden englobarse en uno de los dos grupos siguientes: modelos empíricos y modelos sismológicos. Normalmente, los modelos de generación con aplicación al cálculo estructural, que tienen un sentido eminentemente ingenieril, siguen la línea de los métodos empíricos. Para ello es necesario contar con un buen número de registros de buena calidad de varios terremotos originados en las distintas fuentes sísmicas que afecten el sitio en estudio. Se ha sorteado esta dificultad en varios países con pocos registros, usando modelos definidos para otras regiones, y modificando sus parámetros a condiciones locales, normalmente haciendo regresiones en función de magnitud y distancia epicentral, que son las magnitudes macrosísmicas más accesibles en todas partes. Los modelos sismológicos tienen una aplicación más relacionada al ámbito de la geofísica y geología; son en general más complejos y la determinación de muchos parámetros para

definirlos hace necesario contar con información y conocimientos sismológicos, que la mayoría de las zonas sísmicas del tercer mundo no cuentan aún.

Para este trabajo de investigación se contó con pocos registros, correspondientes a dos eventos sísmicos acaecidos en las Provincias de Mendoza y San Juan. Se tiene también información complementaria valiosa, resultante de los estudios de microzonificación llevados a cabo en las áreas más importantes de las mismas. Se pensó conjugar en la definición del modelo ambas características (empíricos y sismológicos); de esta manera se aprovecha la principal ventaja de los modelos sismológicos, pero sin perder de vista la aplicación ingenieril del mismo.

El modelo de regresión se basa en el modelo de simulación desarrollado por la autora (Orosco, 2004) que hace uso de un acelerograma objetivo a reproducir, por lo que sus bases conceptuales se identifican con el mismo.

A fin de considerar la no estacionariedad de los registros sísmicos tanto en el campo del tiempo como en el de la frecuencia, el modelo se basa en considerar 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 (1990). 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 de Crempien la función de modulación varía en intervalos determinados en el campo de la frecuencia, por lo que presenta continuidad temporal.

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

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

donde el proceso uniformemente modulado se define como

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

por lo que la aceleración del suelo

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

$\dot{x}_{e_k}(t)$  define en cada banda de frecuencia, un proceso estacionario estadísticamente independiente, Gaussiano, de media nula y varianza unitaria, que se expresa mediante la conocida expresión:

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

En la expresión anterior  $S(\omega)$  es la función de densidad espectral de potencia del proceso estacionario en cada franja.

La función espectral adoptada en este trabajo, incorpora en su definición al espectro de Boore de la siguiente manera (Orosco, 2004; Queck et al., 1990):

$$S_{\ddot{x}_e}(\omega) = \frac{1}{2\pi I} A_a^2(\omega) \quad (5)$$

donde  $I$ , denominada *intensidad*, se define como (Queck et al., 1990):

$$I = \int_0^{\infty} |\varphi(t)|^2 dt \quad (6)$$

$A_a(\omega)$  es el espectro de Boore que se expresa como (Boore, 1990):

$$A_a(\omega) = C S_1(\omega) S_2(\omega) S_3(\omega) \quad (7)$$

donde  $C$  es un factor de escala,  $S_1(\omega)$  es el espectro de fuente,  $S_2(\omega)$  tiene en cuenta las posibles amplificaciones por efectos locales de sitio y  $S_3(\omega)$  es el factor de atenuación.

En las expresiones (3) y (7),  $\varphi_k(t)$  son funciones de modulación en función del tiempo, cuyos parámetros se determinan considerando los momentos espectrales del registro, los que se estiman para este modelo mediante una regresión multilínea, en función de la magnitud y la distancia epicentral.

### **3. Metodología**

En base a los conceptos antes expuestos, se define un modelo de generación de sismos artificiales que no hace uso de un registro muestra como semilla de generación. Se basa en técnicas de regresión para definir la función de amplitud que es uno de los puntos claves del modelo.

#### **3.1 Base de datos**

A los registros disponibles para este estudio se los dividió en dos grupos, considerando la magnitud. Un primer conjunto (llamado U1) engloba 30 acelerogramas de eventos de magnitud comprendida en el intervalo [4.9, 6]. Un segundo conjunto de datos (al que se denominó U2), además de los sismos moderados del grupo U1, incluye registros correspondientes a sismos intensos de mayor magnitud. En este último grupo se incluye el sismo de Cauce de 1977 (Magnitud 7.4) y varios del oeste norteamericano, con un régimen tectónico similar al oeste argentino (INPRES, 1995).

#### **3.2 Modelo de regresión propuesto**

Evaluando las distintas alternativas y los distintos parámetros que pueden ser objeto de una regresión, se juzgó conveniente optar por relacionar la energía de los sismos con la distancia epicentral y la magnitud. Se cuenta con expresiones de atenuación de la aceleración máxima de terremotos de corteza superficial para la zona en estudio. Se consideró la hipótesis de que la energía responde a una ley de comportamiento similar a la de la aceleración máxima, lo que se confirmó en el caso de la base de datos usada.

En vista del análisis estadístico realizado a los resultados de la regresión hecha en base a las fórmulas de atenuación existentes, se propone otra expresión que determina la energía del proceso y la duración efectiva en función de dos parámetros más la constante, dejando de lado la distancia epicentral por los bajos valores de significancia obtenidos en el caso de usar la fórmula propuesta por Bufalza (INPRES, 1995). La nueva fórmula de regresión tiene la expresión:

$$\begin{aligned}\log(\lambda_0) &= a + b \log(M) + c \log(\Delta) \\ \log(t_e) &= a + b \log(M) + c \log(\Delta)\end{aligned}\quad (8)$$

Con el modelo anterior, en la estimación de los valores de los momentos temporales de orden 1 y 2 sólo la magnitud tiene relevancia; por ello la fórmula de regresión para los momentos de orden superior se expresa en función de  $\lambda_0$  y  $t_e$  de la siguiente manera:

$$\log(\lambda_i) = a + b \log(\lambda_0) + c \log(t_e) \quad i = 1, 2 \quad (9)$$

donde  $\lambda_0$  y  $t_e$  son determinados mediante (8).

Los resultados de la regresión efectuada para los dos grupos de datos se resumen en la Tabla 1.

Se hicieron experiencias numéricas y se observa una apreciable estabilidad en las formas de las funciones de amplitud determinadas en base a los momentos temporales, en especial para registros de banda angosta que en general corresponde a campo cercano, los que generalmente se mostraban inestables al ser simuladas con fórmulas de regresión existentes; las diferencias son insignificantes para el caso de eventos de banda ancha.

**Tabla 1: Resultados de la regresión**

Parámetros	Grupo U1			Grupo U2		
	a Std t	b Std t	c Std t	a Std t	b Std t	c Std t
$\lambda_0$	-25.02 5.49 -4.56	21.25 2.19 6.65	-0.91 0.29 -3.13	-14.44 3.03 -4.76	15.68 1.54 10.18	-1.20 0.25 -4.73
$\lambda_1$	-1.370 0.174 -7.89	1.125 0.017 65.90	0.897 0.037 24.30	-0.982 0.158 -6.20	1.063 0.013 79.46	0.953 0.040 24.13
$\lambda_2$	-2.853 0.335 -8.51	1.259 0.033 38.18	1.942 0.071 27.24	-1.788 0.298 -6.00	1.118 0.025 44.40	1.975 0.074 26.56
$t_e$	-5.81 3.28 -1.77	3.40 1.91 1.78	0.64 0.17 3.65	-6.42 1.61 -3.98	3.63 0.82 4.43	0.69 0.13 5.11

## 4. Parámetros de Control del Modelo

Los aspectos importantes a considerar para determinar los parámetros que controlan el proceso de generación de historias con determinadas características se explicitan a continuación.

- a) Tipo de registro que se desea obtener: banda angosta o banda ancha.
- b) Distribución de la energía en cada franja frecuencial.
- c) Diseño de la función de amplitud.
- d) Diseño de la función de densidad espectral de potencia.
- e) Control de la energía en cada franja.
- f) Duración efectiva y total, y aceleración máxima.

### 4.1 Tipo de registro

Es posible decidir si se desea obtener un acelerograma de banda angosta o de banda ancha. Tales características son determinadas por el valor del factor de (Vanmarcke, 1980) del registro que se define como:

$$\delta = \sqrt{1 - \frac{\lambda_2^2}{\lambda_0 \lambda_1}} \quad (10)$$

Donde los  $\lambda_i$  son los momentos espectrales del registro  $a(t)$  definidos por

$$\lambda_i = \int_0^{t_f} t^i a^2(t) \quad i = 0, 1, 2 \quad (11)$$

para valores de  $\delta$  mayores a 0.66 se tienen registros de banda angosta y para valores menores a 0.66, registros de banda ancha. Para los registros del sismo de Mendoza'85, se obtienen mejores resultados en el proceso de simulación considerando una división de tres franjas en el campo frecuencial para sismos de banda estrecha, mientras que para los de banda ancha la división en cinco franjas es la apropiada. Pero es posible "crear" un registro con un número de paquetes de energía distinto a tres y cinco, si así se desea.

En base a los datos con que se contó para este estudio, para distancias epicentrales mayores a 40 km se recomienda considerar

historias de banda ancha, para distancias epicentrales menores de 30 km, se aconseja considerar banda estrecha, y para los situados entre 30 km y 40 km se adopta uno u otro criterio de acuerdo al que mejor se adapte a los resultados que se desean obtener. Esto es sólo una sugerencia, ya que se observó en la base de datos algunas variaciones a la tendencia general, pues las características de los movimientos en el sitio de estudio dependen grandemente de las condiciones locales de suelo.

#### **4.2 Distribución de la energía en cada banda de frecuencia**

De todos los análisis numéricos realizados se calculó el promedio del monto de la energía contenido en cada banda frecuencial, tanto para registros de banda angosta como de banda ancha. Esto no impide decidir “a priori” los porcentajes de la energía total con que se dotará a cada banda de frecuencia considerada; así puede tenerse el caso de que se requiera probar el comportamiento dinámico no lineal de una estructura sujeta a una historia de aceleraciones en un rango de frecuencia determinado (cercano al período propio, por ejemplo), y al no contar con registros reales con suficiente energía en tal rango, es preciso simular historias en el tiempo que respondan a esa característica deseada.

#### **4.3 Diseño de la función de amplitud**

A los fines de modular las amplitudes de los acelerogramas simulados, varios investigadores hicieron distintas propuestas de funciones de modulación a lo largo del tiempo (Barbat et al, 1994). La más simple es considerar un pulso rectangular, de duración  $t_f$ . Esta función no describe apropiadamente las variaciones en el valor cuadrático medio de los acelerogramas, que es la característica de la no estacionariedad en el tiempo.

Se probaron varias funciones, a fin de reproducir del mejor modo posible los registros muestras. Los registros disponibles en la base de datos tendían a una función de amplitud tipo gamma, por lo que fue ésta la adoptada para el modelo.

Se define la función gamma de la siguiente manera:



$$\varphi(t_m) = \alpha t_m^\beta e^{-\gamma t_m} \quad (12)$$

en la que la variable  $t_m = t - t_0$  es la variable tiempo modificada por un parámetro  $t_0$  que tiene en cuenta el instante en que irrumpe el pulso, importante a tener en cuenta en el caso de sismos impulsivos, como lo eran la mayoría de la base de datos mendocina. En lo que sigue, se obviará escribirlo de esta manera, pero siempre debe tenerse en cuenta este hecho.

A fin de estimar los parámetros  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  de las funciones de modulación  $\varphi(t)$  en cada franja, se impone la condición de ergodicidad de los procesos no estacionarios (Bogdanoff y Kozin, 1961)

$$\lambda_n = \int_0^{t_f} t^n \varphi^2(t) dt = \int_0^{t_f} t^n a^2(t) dt \quad (13)$$

con lo que se obtienen las siguientes expresiones algebraicas, en las que los parámetros  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  están en función de los momentos temporales obtenidos por regresión,

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{\lambda_0 \gamma^{\beta+1}}{\Gamma(\beta+1)} \\ \beta &= \frac{\lambda_1^2}{\lambda_0 \lambda_2 - \lambda_1^2} - 1 \\ \gamma &= \frac{\lambda_0 \lambda_1}{\lambda_0 \lambda_2 - \lambda_1^2} \end{aligned} \quad (14)$$

Otra manera de estimar la forma de la función de amplitud es mediante relaciones entre los momentos de orden 1 y 2 (que justamente describen el modo en que la energía se distribuye) con respecto al momento de orden 0 (que describe la energía contenida en rango frecuencial considerado) y cuyo valor es el determinado por la técnica de regresión.

Se definen entonces los parámetros  $k_1$  y  $k_2$  como

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{\lambda_1}{\lambda_0} \\ k_2 &= \frac{\lambda_2}{\lambda_0} \end{aligned} \quad (15)$$

Los valores de  $k_1$  y  $k_2$  son fijados a voluntad, según la apariencia de la función de modulación que se desea lograr en cada franja frecuencial. Por ello, los valores medios se muestran a título de ejemplo. A fin de asegurar que la modulación del proceso uniforme en cada franja sea mediante la función gamma, los valores de  $k_1$ ,  $k_2$  y  $t_0$  deben satisfacer los siguientes requisitos, a fin de que los parámetros de la función no resulten negativos, en especial el valor de  $\beta$

$$\sqrt{\frac{k_2}{2}} < k_1 < \sqrt{k_2} \quad (16)$$

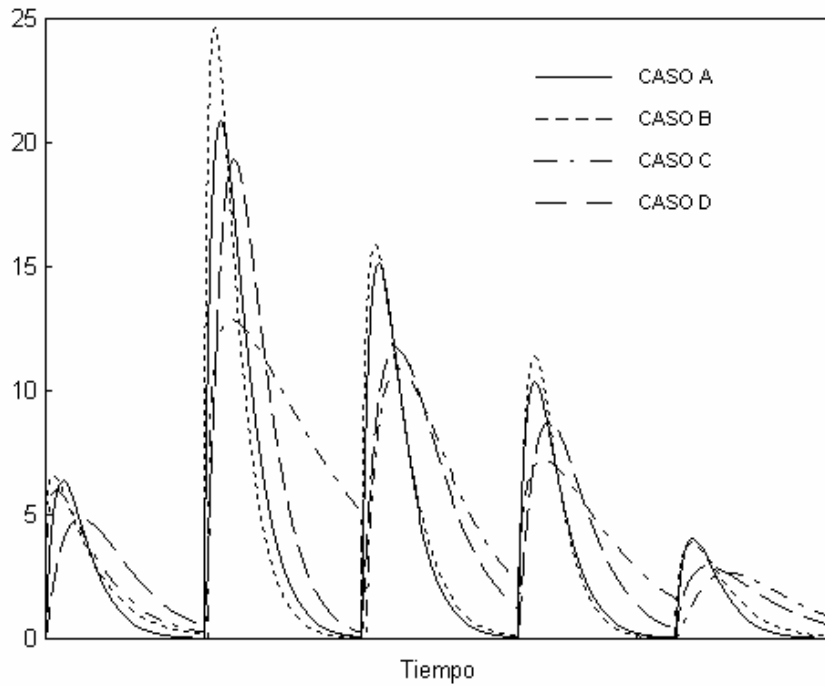
$$-k_1 - \sqrt{3k_1^2 - k_2} < t_0 < -k_1 + \sqrt{3k_1^2 - k_2} \quad (17)$$

La Tabla 2 muestra algunos ejemplos de pares de valores  $k_1$  y  $k_2$  que se agrupan en los denominados casos B, C y D y cuyas funciones resultantes se aprecian en figura 2; las historias correspondientes se muestran en la figura 3

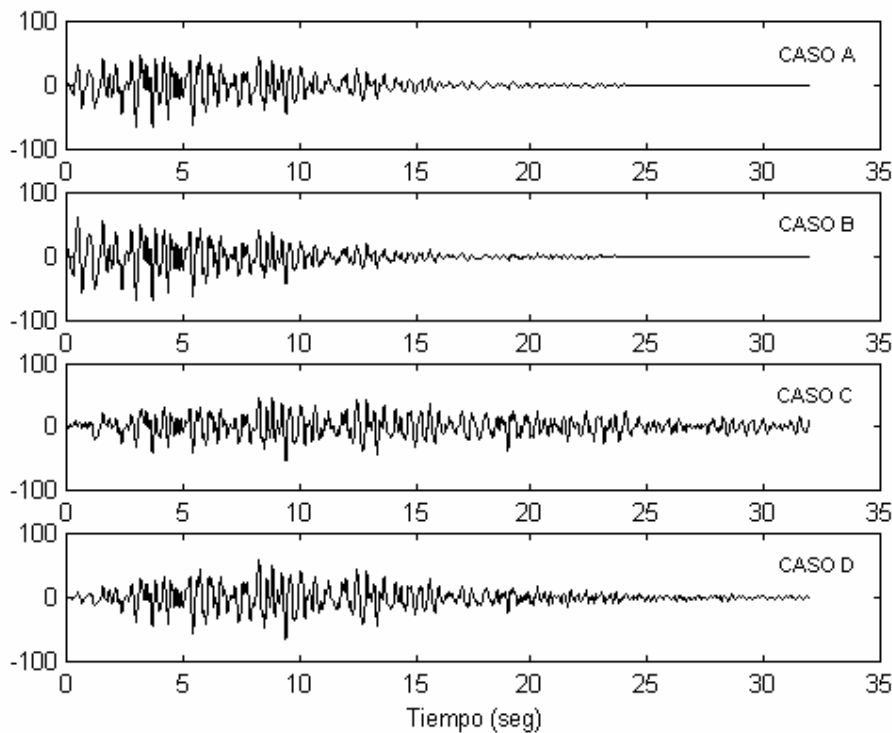
**Tabla 2: Ejemplos de valores de  $k_1$  y  $k_2$  para sismos de banda ancha**

Franja	Caso B		Caso C		Caso D	
	$k_1$	$k_2$	$k_1$	$k_2$	$k_1$	$k_2$
1	5.00	43.17	6.00	59.51	10.33	140.24
2	4.00	23.07	15.00	356.93	7.95	77.72
3	5.00	36.52	12.00	195.09	10.12	135.00
4	5.00	32.82	11.00	185.87	8.79	99.47
5	6.00	52.70	15.00	287.58	10.96	168.38

En todos los casos mostrados en la figura 2, se consideró un valor nulo para el parámetro  $t_0$ .



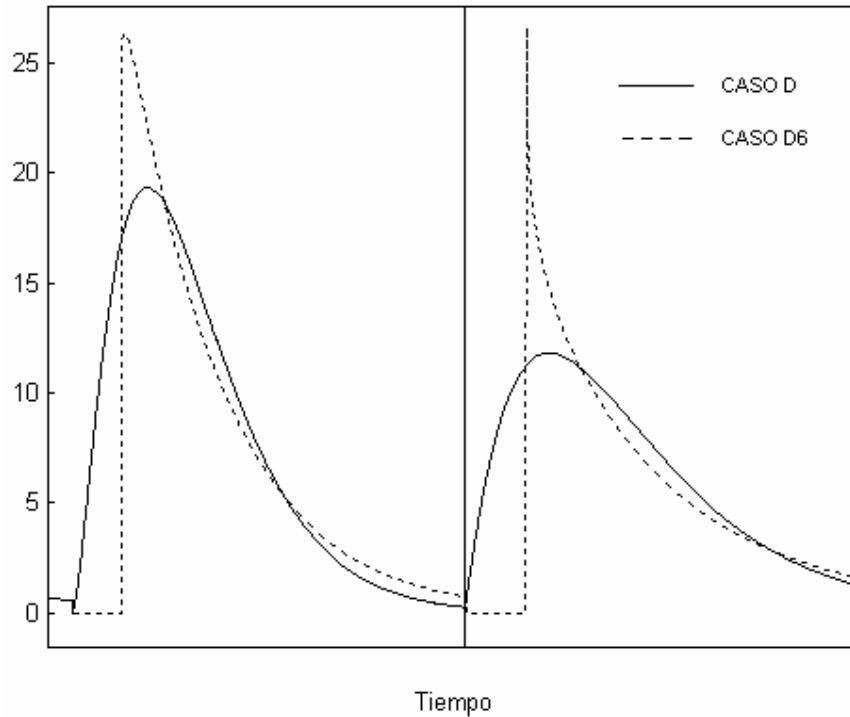
**Figura 2: Función de amplitud para registros de banda ancha**



**Figura 3: Historias simuladas para los casos de figura 2**

El caso denominado A corresponde a las funciones de amplitud determinadas por aplicación directa de las fórmulas (14)

En el caso que se consideren valores de  $t_0$  que no cumplan con la condición (17) pueden obtenerse funciones envolventes del tipo que se muestra en la figura 4, para las franjas tercera y cuarta del caso D. Si el valor del parámetro es mayor que el límite superior, la función se hace muy estrecha en la punta y deja de ser del tipo gamma.



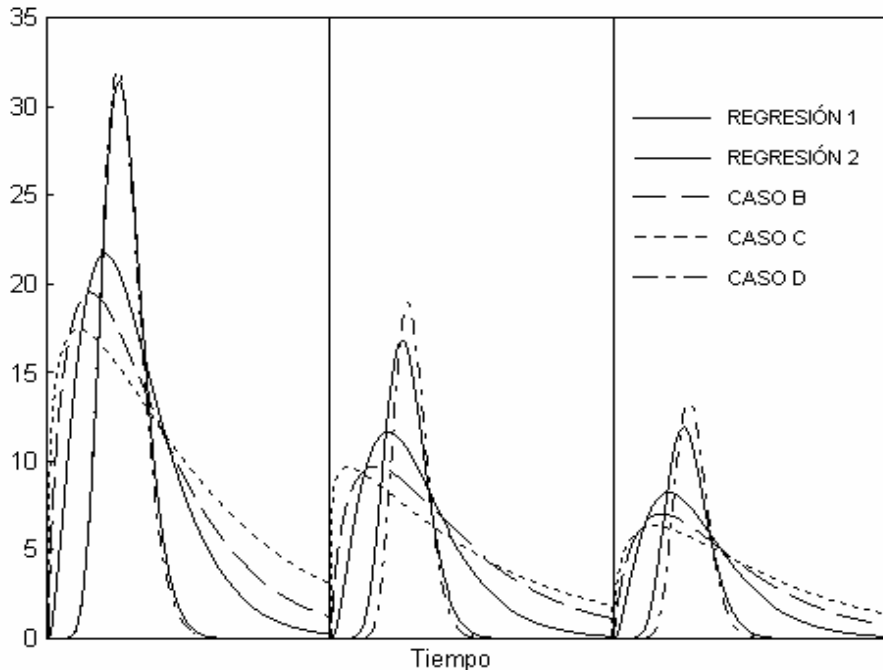
**Figura 4: Función envolvente obtenida cuando  $t_0$  no cumple la condición (18)**

Analizando el caso de registros de banda angosta, en la Tabla 3 se anotan los valores correspondientes a tres combinaciones de valores de las relaciones entre los momentos espectrales ( $k_1, k_2$ ) con las que se obtuvieron las funciones de modulación de amplitud que se detallan en la figura 5

**Tabla 3: Ejemplos de valores de  $k_1$  y  $k_2$  para sismos de banda angosta**

Franja	Caso B		Caso C		Caso D	
	$k_1$	$k_2$	$k_1$	$k_2$	$k_1$	$k_2$
1	2.55	9.06	3.00	14.50	2.55	7.00
2	2.90	12.08	3.00	16.00	2.80	8.00
3	2.92	11.59	3.00	17.00	2.91	8.00

Mientras en el caso de sismos de banda ancha, las diferencias de resultados obtenidos considerando la fórmula de atenuación existente (regresión 1) con la propuesta (regresión 2) no difieren mayormente, sí lo hacen notoriamente en este caso, lo que se detalla en la Figura 5, donde el caso A representa los valores de los parámetros de la función estimados a partir de las expresiones de regresión.



**Figura 5: Funciones de modulación para registros de banda angosta**

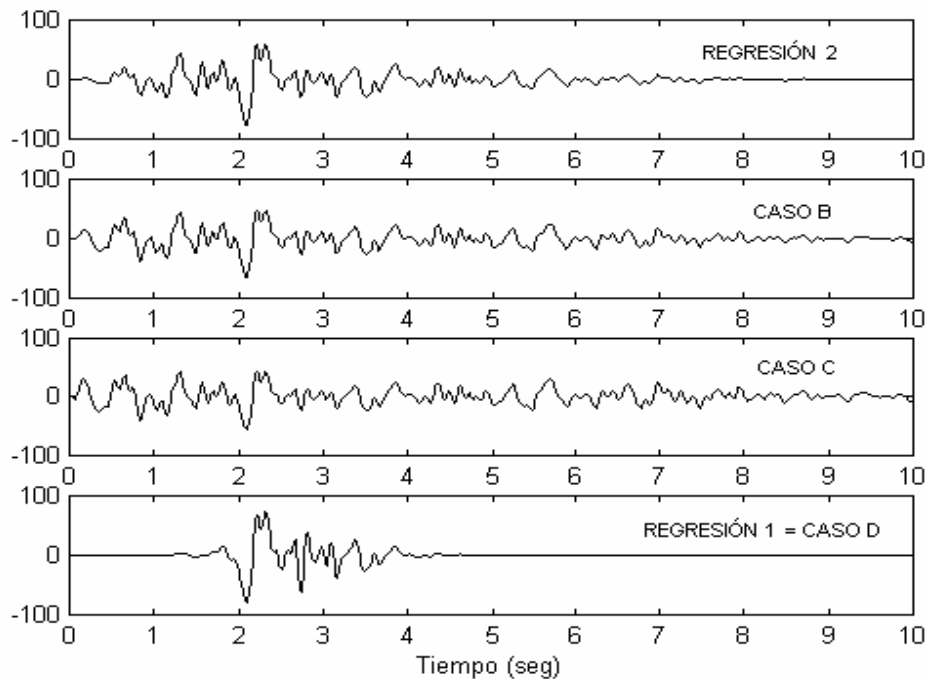
#### 4.4 Diseño de la función de densidad espectral de potencia

La generación de acelerogramas artificiales con este modelo de regresión puede realizarse utilizando como función espectral de potencia una función constante o la que incluye el espectro de fuente de Boore, expresada por (5). En general puede decirse que si se desean registros de banda angosta, como los sismos de tipo impulsivo por ejemplo, la función que incluye el espectro de fuente da mejores resultados, mientras que para los sismos de banda ancha, una distribución constante para la densidad espectral es suficiente.

#### 4.5 Control de la energía

La energía total del registro se determina por regresión lineal, en función de la magnitud y la distancia epicentral. Por medio de la división porcentual de esa energía en las franjas consideradas según el tipo de

registro que se desea, se determina la energía de cada banda y se diseña la función de amplitud correspondiente en base a lo expuesto anteriormente. Una vez que el proceso de generación es llevado a cabo banda a banda, la energía en cada una de ellas es controlada mediante la potencia (energía por unidad de tiempo) de la función de amplitud y la de la historia simulada correspondiente a esa banda frecuencial. Una vez realizada la corrección si correspondiere, se suma la contribución de esta banda al registro total que se genera. Así se logra que la energía del proceso generado es la que se obtuvo por regresión lineal.



**Figura 6: historias generadas para sismos de banda angosta**

#### **4.6 Duración total y efectiva del registro generado**

Con respecto a la estimación de la duración del registro que se busca generar, se pueden considerar distintos criterios. Así por ejemplo, Crempien y Araneda (1993) hacen una regresión lineal sobre la duración de la fase fuerte del movimiento, con la misma fórmula de regresión usada para los momentos. Hay varios aspectos que influyen en la duración del registro en un determinado sitio, la que depende de factores como la frecuencia y la geomorfología del lugar entre otros (Trifunac y Novikova, 1994)

En este trabajo estos parámetros también se determinan por regresión lineal, considerando las dos fórmulas propuestas. Considerando los datos con que se cuenta, se juzga que esta simple metodología dio resultados aceptables. De todos modos, es posible dar valores distintos a los calculados inferidos por necesidades de la aplicación del registro generado (por ejemplo, para probar casos de licuefacción de suelos se puede exigir sismos de mayor duración total y efectiva), o por condiciones particulares del suelo y la topografía en el sitio de estudio.

Una vez definida la duración total del evento a simular, a los fines del algoritmo de simulación se debe definir el paso de discretización de la variable tiempo para determinar el número de puntos del acelerograma artificial. La función temporal de amplitud no depende del intervalo de discretización  $\Delta t$  pero sí hay diferencias en el campo frecuencial. Cuanto más grande sea este paso de tiempo, el contenido espectral es menor y si la duración total del acelerograma generado es pequeña se perderá información.

Como ejemplo, para simular acelerogramas con una duración de 5 a 6 segundos, un paso de discretización temporal de 0.005 segundos dio buenos resultados; en el caso de registros de 10 segundos de duración total, un paso de 0.01 segundos dio resultados satisfactorios. Puede sugerirse que si la duración total es mayor a 20 segundos, un intervalo de tiempo de 0.02 segundos es lo aconsejable.

#### **4. 7 Aceleración máxima del registro generado**

Finalmente, con respecto a la aceleración máxima deseada, ésta puede ser definida en base a la obtenida por alguna fórmula de regresión, por condiciones geomorfológicas, exigencias de algún reglamento, etc. En general por este método se obtienen aceleraciones cercanas a las exigidas, dependiendo del buen diseño de la función de amplitud principalmente; se admite una ligera corrección del pico, siempre y cuando esto no implique deformaciones inadmisibles de la forma del registro.

## 5. Ejemplo de Aplicación

Con los conceptos antes expuestos se ha confeccionado un programa de computadora (PREDICE) con el que se ha realizado una amplia experimentación numérica dando resultados satisfactorios tanto para sismos moderados como intensos. Se muestra un ejemplo que tiene como objetivo simular acelerogramas de un evento similar al ocurrido el 24 de Junio de 1984 en Granada (España). No es el principal propósito de este modelo generar acelerogramas concordantes con alguno tomado como muestra, pero se desea analizar los alcances de la aplicación del modelo y ver de qué manera es posible controlar sus parámetros a fin de obtener historias con características determinadas a priori. El espectro de Boore fue estimado con los siguientes valores (Morales et al., 1996):

Magnitud: 5

Distancia epicentral: 40.4 km

Profundidad: 12 km

Momento sísmico:  $3.0 \cdot 10^{16}$  N-m

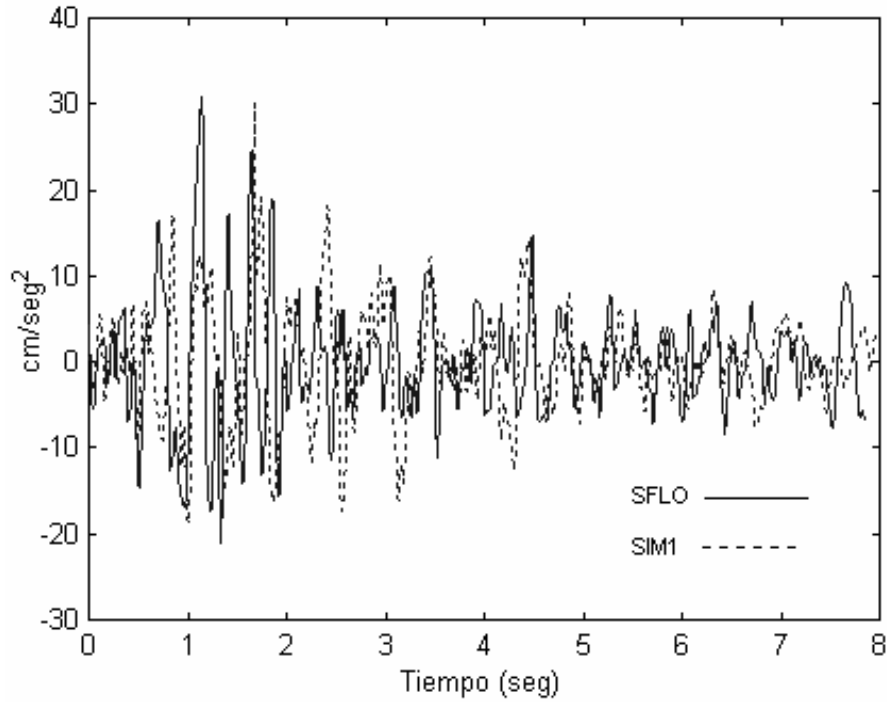
Caída de tensión:  $0.100 \cdot 10^8$  N/m<sup>2</sup>

Frecuencia máxima: 25 Hz

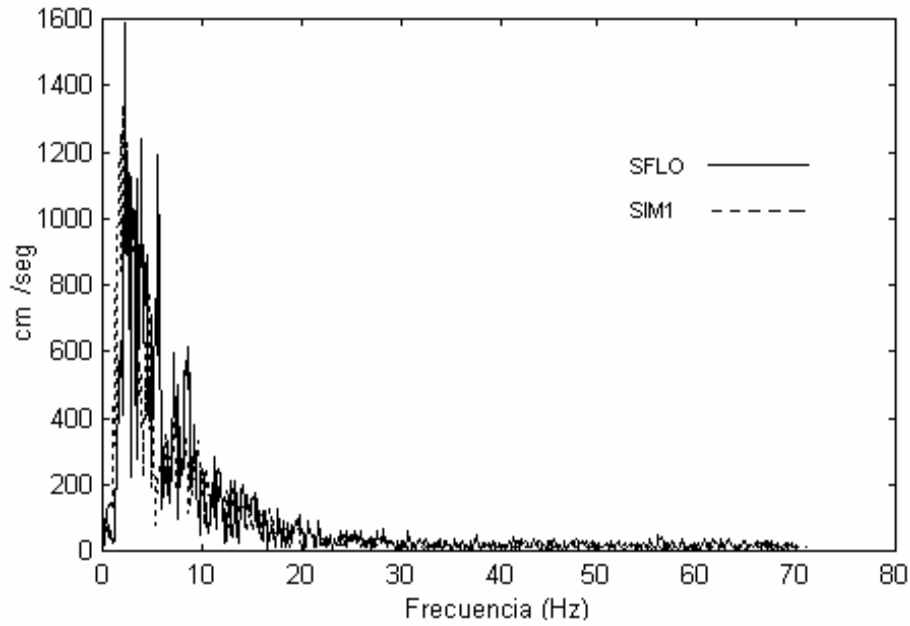
Coeficiente de atenuación dependiente de la frecuencia:  $80 f^{0.65}$

La historia temporal de las aceleraciones registradas en Santa Fe corresponde a un evento de banda angosta por lo que se procedió a dividir el espectro en tres franjas frecuenciales, con un contenido energético en cada franja de 85%, 10% y 5% respectivamente. En cuanto a las funciones de amplitud que modula el proceso estacionario en cada franja dieron buenos resultados las diseñadas tanto en base a parámetros determinados por regresión, como para relaciones entre momentos espectrales correspondientes al caso B de la Tabla 3 y valores del parámetro  $t_0$  de 0.06, 0.05 y 0.10 segundos para cada franja respectivamente.

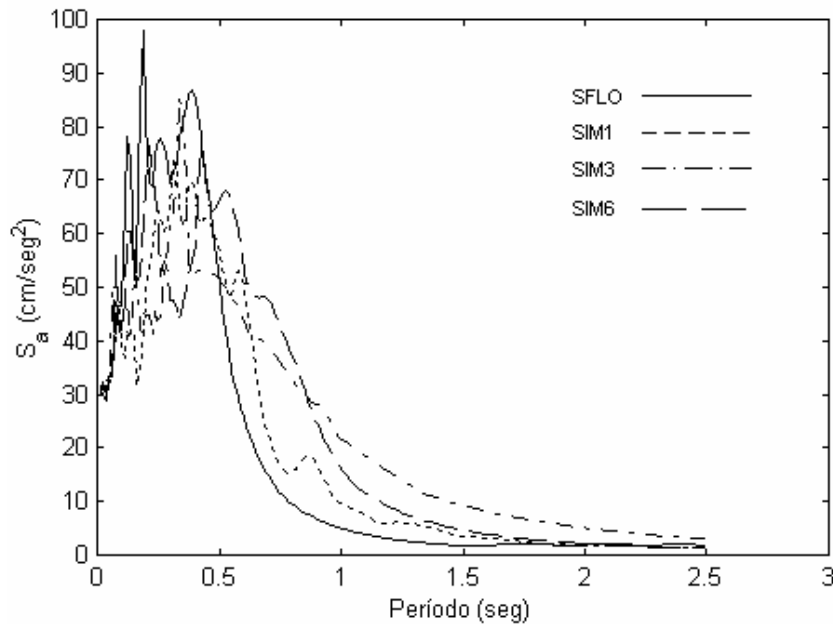




**Figura 7: Registros SFLO y SIM1**



**Figura 8: Espectros de Fourier de SFLO y SIM1**



**Figura 9: Espectros de respuesta elástica de SFLO y tres simulaciones**

En las figuras se observan los resultados obtenidos para uno de los seis casos de simulaciones efectuadas. Se muestran la historia simulada y su respectivo espectro de amplitudes de Fourier, cotejándolas con el registro y espectro de Fourier originales. La figura 9 muestra los espectros de respuesta elásticos para tres simulaciones y puede observarse una buena correspondencia con el del registro original.

## 6. Conclusiones

- \* En cuanto a las **bases conceptuales** sobre las que se define este modelo, se contempla la no estacionariedad temporal y frecuencial, mediante la aplicación del concepto de espectro evolutivo donde la evolución del contenido frecuencial en el tiempo se materializa mediante una discretización del proceso en el campo frecuencial, considerando luego en el campo del tiempo a cada franja componente como un proceso estocástico uniformemente modulado, metodología utilizada previamente por varios autores y aplicada a zonas que cuentan al menos con un registro.
- \* Se comprobó que tanto la aceleración máxima como la energía de los registros de la base de datos utilizada siguen una distribución similar con respecto a la distancia epicentral y la magnitud del sismo.
- \* Se propone una fórmula de regresión distinta a las existentes para la región; consta de dos partes: primeramente se realiza una regresión para determinar el momento de orden 0 (energía del registro) y las duraciones efectiva y total, los parámetros que estadísticamente tanto la magnitud como la distancia epicentral explican significativamente con las fórmulas de atenuación. Los momentos de orden 1 y 2 se determinan también por regresión, mediante una expresión que es función de la energía y la duración efectiva determinadas por regresión.
- \* Con estas expresiones el modelo (denominado de “regresión 2”) presenta mejores niveles en las pruebas de confianza y significancia estadísticas que el modelo basado en las fórmulas de atenuación existentes para la zona bajo estudio (identificado como modelo de “regresión 1”).
- \* Se realizaron simulaciones utilizando ambos conjuntos de datos y con ambas fórmulas de regresión. Se detectaron diferencias entre las funciones de amplitud logradas con uno u otro método al utilizar el grupo U1 de datos, sobre todo para registros de campo cercano. Al ampliar la base de datos y hacer uso del grupo U2, se observa mayor estabilidad en la formas de las funciones como así también una reducción apreciable de las diferencias en los resultados según ambos métodos, tanto para eventos de campo cercano como lejano.
- \* Las regresiones se realizaron sobre los datos sin hacer especiales correcciones ni filtrados de ruidos o fallas de muestreo. Por ello, los

momentos de orden 1 y 2 resultantes conllevan estos efectos que como se explicó antes, dependen del intervalo considerado antes del primer impulso de la señal, esto es del parámetro  $t_0$  y el ruido de la señal (parámetro  $\delta$ ).

\* En este caso, el modelo no cuantifica automáticamente estos parámetros por lo que las funciones de amplitud resultantes pueden ser defectuosas y no describir apropiadamente la variación temporal de la señal. Se determinaron fórmulas explícitas para corregir los momentos temporales de orden 1 y 2 a fin de incluir estos efectos de manera simple y clara en la determinación de los mismos.

\* Esta corrección se impone en caso de generar sismos impulsivos de banda angosta y no es tan crítica en el caso de eventos de banda ancha.

\* Una vez determinados los momentos temporales totales, se calculan los mismos para cada franja como **fracciones de los respectivos momentos totales**, considerándose los mismos porcentajes del contenido energético de la franja con respecto a la energía total del evento.

\* Se proponen dos parámetros  $k_1$  y  $k_2$ , que simplemente relacionan los momentos espectrales de orden 1 y 2 con el momento de orden 0 del registro, respectivamente. Se puede manipular los momentos de orden 1 y 2 a fin de permitir la **construcción de historias probables** de ocurrir en un lugar determinado, con características específicas de acuerdo a la aplicación que se hará de las historias simuladas, manteniendo el momento de orden 0 (que representa la energía de la franja) inalterable.

\* En este caso, el momento temporal determinado por regresión es el de orden 0 y en función de éste se calculan los de orden superior, en función de  $k_1$  y  $k_2$ . Se ha pensado esta alternativa para controlar de alguna manera el diseño de las funciones de amplitud en cada franja, variando el modo en que la energía se distribuye, pero no su intensidad.

\* A fin de asegurarse que la función de amplitud sea del tipo gamma los parámetros  $k_1$ ,  $k_2$  y  $t_0$  deben satisfacer ciertas condiciones que se explicitan en el trabajo.

\* Se ha experimentado con varias combinaciones entre estos parámetros, de lo que resultaron algunas reglas simples que se pueden sugerir a fin de diseñar funciones de características específicas determinada. Si se desean funciones gamma angostas se debe considerar valores bajos de  $k_2$  y si se desean que las funciones gamma sean simétricas, se debe considerar un valor de  $k_1$  cercano al límite superior del intervalo de valores que resulta de aplicar los requisitos de función gamma.

\* **La aceleración máxima, duración efectiva y duración total**, se determinan mediante fórmulas de regresión con los parámetros determinados para la base de datos usada o bien por consideraciones específicas del lugar de estudio y fines de la simulación. En cuanto a la duración de los sismos generados, los parámetros determinados por regresión lineal condujeron a resultados satisfactorios en todos los casos analizados; de todos modos, se pueden determinar a priori y por otras consideraciones, valores distintos a los determinados por regresión, que como se acotó repetidas veces, resumen características de la base de datos utilizada en este trabajo.

\* En cada franja se controla que la energía del proceso uniformemente modulado generado tenga mínimas diferencias con respecto a la energía asignada a la banda frecuencial. Una vez obtenido el registro artificial se controla que la energía total del mismo sea similar a la obtenida por regresión. En general, se obtienen valores picos del orden de los determinados por la fórmula de atenuación para la zona cuyana para suelo duro; el programa admite la posibilidad de una corrección que no altere las características dinámicas básicas de la historia generada.

\* Una vez generado el registro artificial se debe proceder a su corrección de línea base, tal como se realiza con los registros reales (por ejemplo) mediante el clásico procedimiento de Berg y Housner.

\* Se realizó una amplia experimentación numérica, aplicando el modelo principalmente a la zona bajo estudio. Dio resultados satisfactorios para predecir posibles movimientos en un determinado sitio, tanto moderados como intensos. Debido a la exigua base de datos con que se contaba al momento de realizar esta investigación, la mayor confiabilidad corresponde a sismos moderados en el área de la capital mendocina y del Gran Mendoza, en la República Argentina. Se

considera de todos modos que **la metodología propuesta es válida para cualquier sitio**, con sólo considerar los datos apropiados.

## Referencias

- Barbat, A.H., Orosco, L., Hurtado, J. y Galindo M. *Definición de la acción sísmica, Monografía CIMNE IS-10*, Editor: Alex Barbat, Barcelona, España.1994
- Bogdanoff, J.L. and Kozin, F. Comment on reliability of structures in resistance chance failure, *Oper. Res.*, Vol 9, pp 123-126, 1961
- Boore, D.M.The prediction of strong motions, *Proceedings NATO Advanced Studies Institute, Strong Ground Motions Seismology*, Ankara, Turkey.1990
- Carli, F. and Faravelli, L. A non stationary seismological model for strong ground motions, *European Earthquake Engineering*, Vol 3, pp 29-42. 1990
- Crempien, J. y Araneda, P. (1993). 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
- Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES). Microzonificación sísmica del Gran Mendoza – *Resumen Ejecutivo. Publicación Técnica No 19*, San Juan, Argentina. 1995
- 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. 1996

Orosco, L. Simulación de movimientos sísmicos intensos para zonas con pocos registros y su aplicación a la evaluación del comportamiento de estructuras, *Tesis doctoral*, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España. 2004

Queck, S., Teo, Y. and Balendra, T. Non stationary structural response with evolutionary spectra using seismological input model, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol 19, pp 275-288. 1990

Saragoni, R. and Hart, G.C. Simulation of artificial earthquakes, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol 2 (3), pp 249-267. 1974

Trifunac, M.D. and Novikova, E.I. State of the art review on strong motion duration, *Proceedings of the 10<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering*, Viena, Austria, pp 131-140. 1994

Vanmarcke, E.H. Parameters of the spectral density function, their significance in the time and frequency domain, *MIT Civil Engineering and Design*, 60-1. 1980

## **Agradecimientos**

Un profundo agradecimiento al Dr. Jorge Crempien–Laborie de la Universidad de los Andes (Chile) por sus valiosas sugerencias para la realización de este trabajo.