

# Aplicación De La Transformada Wavelet Para Generar Acelerogramas Artificiales Compatibles Con El Espectro De Diseño Sísmico De La NSR-10

Daniel Andres Ramirez Gomez <sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Estudiante de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana Cali*

## Resumen

Con base a la metodología de los trabajos de Suarez y Montejo (2005) usando la transformada “Wavelet”, para generar acelerogramas artificiales compatibles con el espectro de diseño sísmico de la NSR-10 para Cali ubicada en una zona de alta amenaza sísmica, debido a que en el sur-occidente de Colombia los registros de acelerogramas de terremotos fuertes son escasos. Esta metodología especifica el uso del registro original para descomponerlo en un número adecuado de funciones llamadas “detalles”, finalmente reconstruir la señal escalando estos detalles, de tal forma que el espectro de respuesta de la señal generada concuerde al espectro de diseño. Esto se realiza con ayuda de un algoritmo numérico utilizando el software MATLAB.

Se observa que los acelerogramas generados son compatibles con porcentajes de error menor al 5% con un máximo de 9 iteraciones. Finalmente se compara los resultados de un análisis dinámico lineal “Time-History” con el acelerograma generado y un análisis modal espectral con ayuda de programas como ETABS y SAP 2000, y se observa que existe una proporcionalidad entre los resultados.

**Palabras claves:** *Ingeniería Sísmica -Transformada Wavelet - Acelerogramas artificiales – Espectro de diseño – Señal objetivo – Señal reconstruida– Compatibilidad – NSR 10 – Análisis dinámico lineal – Análisis modal espectral.*

## Introducción

Cuando se desarrolla un análisis dinámico a estructuras especiales es necesario saber la respuesta de sitio debido a un sismo. En la actualidad, se cuenta con tres métodos para conocer esta respuesta, dado: un registro sísmico real, un acelerograma artificial compatible con el espectro de diseño o por medio de registros sísmicos sintéticos obtenidos de modelos sísmicos.

Se propone un desarrollo a través del uso de la Transformada “Wavelet”, que es una herramienta poderosa que ha encontrado numerosas aplicaciones en el procesamiento digital de señales en dinámica estructural e ingeniería sísmica en las dos últimas décadas; con lo que se

busca modificar registros sísmicos previos, con el fin de generar acelerogramas artificiales que sean compatibles con los espectros de diseño sísmico prescritos por la NSR-10 para la ciudad de Cali.

## Objetivo general

Implementar un método basado en la Transformada “Wavelet” para la generación de registros sísmicos artificiales, propuesto por Suárez y Montejo (2005), de acuerdo a los espectros de diseño sísmicos del reglamento colombiano NSR-10, para la ciudad de Cali.

## Objetivos específicos

- Generar con ayuda de un algoritmo en MATLAB basado en la Transformada

“Wavelet”, una serie de registros sísmicos artificiales compatibles con los espectros del código NSR-10.

- Obtener los espectros de respuestas de los registros artificiales generados mediante la Transformada “Wavelet”.
- Efectuar el análisis dinámico lineal (time-history) de una estructura con el registro sísmico generado, y obtener los desplazamientos máximos.
- Comparar los desplazamientos máximos de un análisis modal espectral con el espectro de diseño base y los obtenidos con el análisis dinámico lineal (time-history) usando el registro sísmico artificial.

- *Transformada Wavelet*

La transformada “wavelet” es una herramienta matemática para descomposición de señales  $f(t)$  y depende de dos parámetros: el tiempo  $b$  y la escala  $a$ . Para efectuar la transformada, la “wavelet madre” es escalada por una constante real  $a \neq 0$  y trasladada con un parámetro real  $b$ :

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1)$$

La transformada continua “wavelet” puede ser ahora definida como la suma en el tiempo del producto de la señal por la versión escalada y trasladada de la “wavelet” original:

$$C(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2)$$

En todas las aplicaciones prácticas, los coeficientes  $C(a,b)$  son de alguna manera modificados para lograr un objetivo dado antes de transformarlos de vuelta al dominio original de la señal. La señal  $f(t)$  puede ser recuperada con la llamada “fórmula de reconstrucción”:

$$f(t) = \frac{1}{K_{\psi}} \int_{a=0}^{\infty} \int_{b=-\infty}^{\infty} C(a,b) \psi(t) db \frac{da}{a^2} \quad (3)$$

- *La nueva “wavelet” respuesta a impulso*

La selección de una “wavelet” apropiada para una aplicación dada es fundamental para que la implementación de la transformada “wavelet” sea exitosa. Los autores definieron una nueva “wavelet”, basada en la función respuesta a impulso unitario para un oscilador sub-amortiguada. La “wavelet madre” tiene la siguiente forma:

$$\psi(t) = e^{-\xi\Omega|t|} \text{sen}(\Omega t) \quad (4)$$

donde,  $\xi$  y  $\Omega$  son dos parámetros que gobiernan el decremento y la variación en el tiempo de la “wavelet”.

La siguiente metodología es la propuesta por Suarez y Montejo (2005) para lograr la compatibilidad de un sismo artificial con un espectro objetivo.

El método propuesto se basa en descomponer el acelerograma original en un número finito de detalles definida por una frecuencia dominante y escalar cada detalle iterativamente con respecto a espectro objetivo hasta lograr la compatibilidad deseada (Montejo, 2004).

- *Modificación del acelerograma*

La NSR-10 en el numeral A.2.7.1, tiene en cuenta magnitudes, distancias hipocentrales, falla causante, y mecanismos de ruptura similares, al igual que Bommer y Acevedo (2004), que describe la influencia de cada uno de estos parámetros. Por lo que es conveniente que se cumplan las características para los sismos usados, sin embargo como lo sustenta Montejo (2004), el método altera en gran parte el contenido de frecuencias del registro original.

A continuación se presenta un ejemplo numérico, partiendo del sismo de Parkfield (09/28/04 17:15), buscando sea compatible el espectro de diseño sísmico de la NSR-10 para la ciudad de Cali y se restringe el problema a los suelos tipo B y C.

La Figura 1 muestra la señal original del sismo de Parkfield con una aceleración pico 0,174 g (de sus siglas en inglés PGA) con una duración de 21,3 segundos.

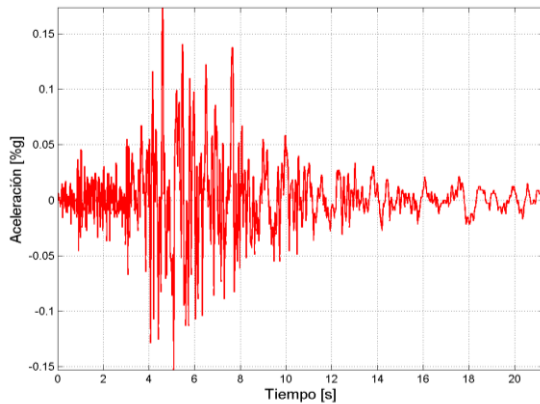


Figura 1. Acelerograma original para el sismo de Parkfield

El PGA del espectro diseño u objetivo para suelo tipo B es de 0,275 g y para suelo tipo C 0,316 g, de acuerdo a los parámetros establecidos para el espectro objetivo.

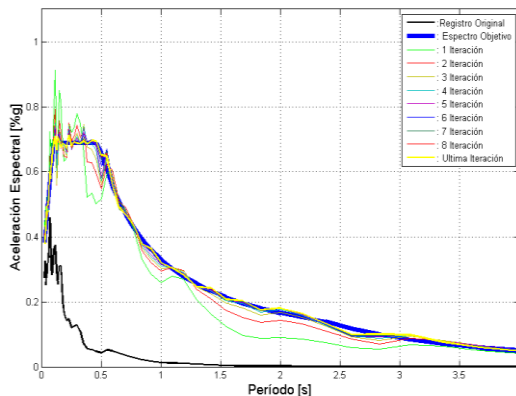
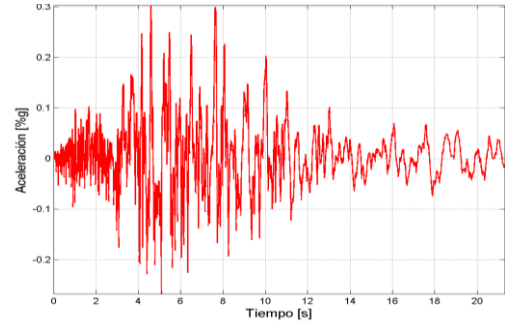


Figura 2. Espectro de respuesta para un suelo tipo B en Cali del sismo de Parkfield de cada iteración.

El resultado del proceso iterativo se visualiza en la Figura 2, donde se observa que a medida que el número de iteraciones aumenta el espectro de respuesta de la señal generada, se acerca cada vez más al espectro objetivo.



En la Figura 3 se presenta el acelerograma resultante del procedimiento con un PGA aproximado de 0,31 g, debido a la escala producida por el procedimiento y se puede observar que esta sucede casi en el mismo instante de tiempo. Suarez y Montejó (2005), explican que debido a que cada detalle tiene una frecuencia predominante, el procedimiento modifica el contenido de frecuencias de la señal.

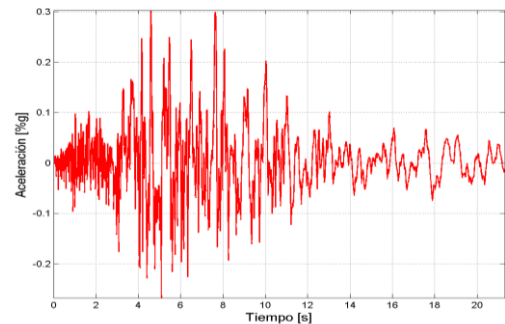


Figura 3. Acelerograma modificado para un suelo tipo B en Cali del sismo de Parkfield.

En las siguientes Figuras 4 y 5 se realiza el mismo procedimiento con un tipo de suelo diferente en el espectro de objetivo o diseño.

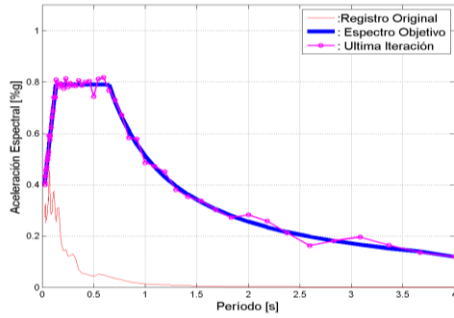


Figura 4. Espectro objetivo, espectro de respuesta original y modificado para un suelo tipo C en Cali del sismo de Parkfield.

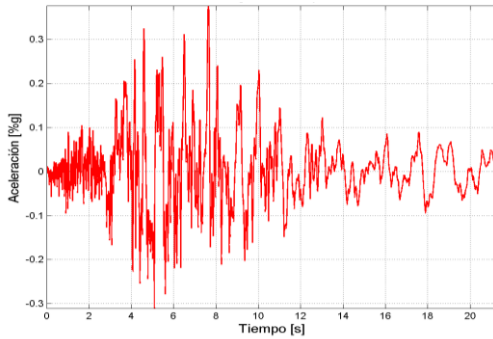


Figura 5. Acelerograma modificado para un suelo tipo C en Cali del sismo de Parkfield

Como todo proceso iterativo se observa en la

Figura 6 que el porcentaje de error, disminuye drásticamente en las primeras y después de la sexta iteración tiende a disminuir más suavemente.

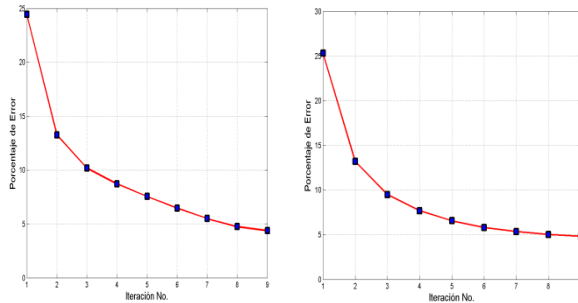


Figura 6. Porcentaje de error para suelo (izq.) tipo B y (der.) tipo C en Cali del sismo de Parkfield.

- Comparación de desplazamientos máximos

La Tabla 1 presenta la información de los desplazamientos máximos de la cubierta del espectro objetivo (diseño) por el método de análisis modal espectral.

En las Figuras 7 y 8 se muestran los resultados de desplazamientos máximos de la totalidad de los pisos, presentándose diferencias muy insignificantes en los 5 primeros niveles, y con un leve incremento al acercarse al último nivel. Se observa que existe una relación entre la magnitud del sismo y el desplazamiento máximo lateral.

Se observa que en algunas ocasiones los valores del espectro de diseño, son mayores a comparación del análisis cronológico, debido a que el análisis por espectro de respuesta representa los máximos valores durante un evento sísmico.

Tabla 1. Desplazamientos máximos en la cubierta de los análisis sísmicos (NSR-10).

Modelo	Suelo B	Suelo C
	Ux [cm]	Ux [cm]
Espectro Objetivo	11.645	18.035
Loma Prieta	11.712	18.058
Michoacán	12.586	19.301
Parkfield	11.071	16.694

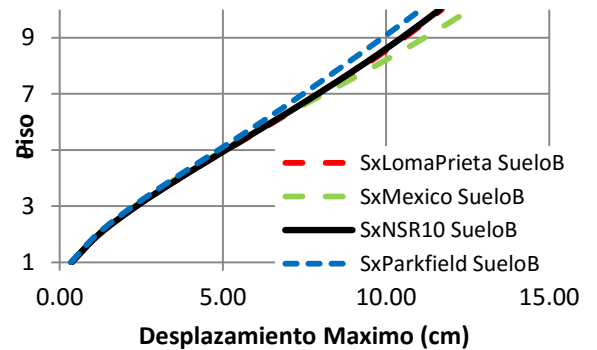


Figura 7. Desplazamientos máximos en X de los análisis dinámicos para suelo B

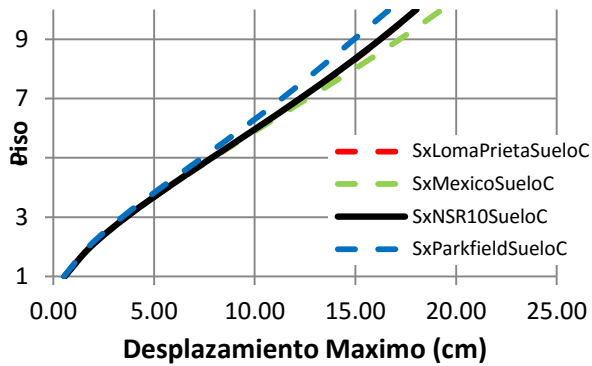


Figura 8. Desplazamientos máximos en X de los análisis dinámicos para suelo C

### Conclusiones

El método para generar acelerogramas artificiales por medio de la Transformada de “Wavelet”, se presenta como una de las herramientas apropiadas para el caso en donde se presenta escases de registros sísmicos fuertes y es por ello que se decidió implementar este procedimiento, arrojando resultados en donde se visualiza la compatibilidad de los acelerogramas generados con el espectro de diseño de la NSR-10 y debido a la normativa, fue necesario realizar un análisis adicional para comprobar la compatibilidad con el espectro de diseño de la Microzonificación Sísmica de Cali.

A la hora de seleccionar los acelerogramas reales a modificar, es claro que entre más criterios se cumplan, seleccionando sismos muy parecidos a los que se puede llegar esperar con base a los diferentes estudios de amenaza sísmica, se podrán obtener resultados más acorde a la realidad.

Los resultados del análisis dinámico “Time-History” en el rango lineal realizados en ETABS, confirman de cierto modo la utilidad del método, debido a que se generan desplazamientos máximos muy similares a los encontrados con un análisis modal espectral.

Las normas sismo resistentes y en especial la NSR-10, no especifican detalladamente los criterios y/o procedimientos necesarios para generar acelerogramas artificiales. Este procedimiento podría llegar a ser necesario, debido a la poca posibilidad existe en algunos lugares, de contar con el número necesario de registros sísmicos, en donde es necesario un número aproximado de 3 o hasta 7 registros; para contemplar la alta incertidumbre que se tiene de un eventual sismo y sus características.

### Referencias

- Bommer, J.J., Acevedo, A.B., 2004. *The use of real earthquake accelerograms as input to dynamic analysis. Journal of Earthquake Engineering 1(1): 43-91.*
- Center for Engineering Strong Motion Data, CESMD : VDC database, <http://strongmotioncenter.org/vdc>
- Montejo, L. A., 2004. “Generation and analysis of spectrum-compatible earthquake time-histories using wavelets” *MS Thesis, University of Puerto Rico at Mayagüez, Mayagüez, PR.*
- Suárez, L.E., Montejo, L. A., 2005 “Generation of artificial earthquake via the wavelet transform” *International journal of solids and structures Vol. 42, p. 5905-5919. University of Puerto Rico, Mayagüez, PR.*