



Generación de acelerogramas artificiales usando funciones de green empíricas para la réplica principal del Terremoto de Iquique 2014

Stefano Cararo*, Sergio Ruiz

Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Avenida Beauchef 850, Santiago, Chile

* email: scararo@u.uchile.cl

Resumen. Utilizando la sismicidad registrada por la densa red del Norte de Chile para la secuencia del terremoto de Iquique del 2014, se modela la réplica principal Mw7.6 usando eventos de menor magnitud con el método de funciones de green empíricas. Primero se valida el método usando un evento Mw6.2 a partir de un evento más pequeño Mw5.1. Luego se hace un estudio de la sensibilidad del método ante variaciones espaciales, donde el terremoto a modelar está a más de 20 km del evento de menor magnitud que lo modelará. Se usa un evento Mw5.4 para modelar un Mw6.5 para este propósito.

Por otro lado, se comparan los registros de dos eventos Mw5.0 y Mw5.2, a menos de 10 km, que sirven de semilla para un evento de mayor magnitud.

Finalmente se modela la réplica mayor Mw7.6 a partir de dos pequeños eventos cuyas magnitudes son Mw6.1 y Mw3.5.

Para eventos pequeños se concluye que el método funciona satisfactoriamente modelando los desplazamientos en un amplio rango de frecuencias, pero para el terremoto Mw7.6, existen dificultades para modelar las frecuencias más bajas por lo que se abordan otras variables, como forma, valores de aceleración máxima y duración de la señal.

Palabras Claves: función de green, empírico, megaterremotos, modelación, acelerogramas, Irikura.

1 Introducción

Simular las ondas de altas frecuencias en acelerogramas es un problema que no ha sido del todo resuelto. Los métodos de simulación de acelerogramas artificiales usando funciones de green teóricas, modelan satisfactoriamente los sismogramas en su espectro de baja frecuencia pero presentan dificultades al momento de reproducir ondas de

alta frecuencia.

Aki(1968) y Haskell(1969) hicieron los primeros cálculos teóricos los cuales siguen desarrollándose a través de diversos autores, consolidando la simulación de sismogramas en bajas frecuencias (< 1 Hz).

Sin embargo la simulación de altas frecuencias sigue siendo de interés para investigadores, es así como Hartzel and Helmberg (1982) e Irikura (1983) proponen utilizar eventos más pequeños como funciones de green y así modelar eventos más grandes. La ecuación (1) representa el método propuesto por Irikura (1983)

$$G(x, t) = \sum_{l=1}^{N_L} \sum_{m=1}^{N_M} \sum_{d=1}^{N_D} \frac{R_c^t r^s}{R_c^s r^t} \cdot C \cdot G_{el,m_o}(x, t - t_{elm} - t_{dklm})$$

$$C = \frac{\sigma_t}{\sigma_s} \text{ Razón de caídas de esfuerzos}$$

R_c^t : Patrón de Radiación del evento target

R_c^s : Patrón de Radiación del evento semilla

r^s : Distancia hipocentral de la semilla

r^t : Distancia hipocentral del target

$G_{el,m_o}(x, t - t_{elm} - t_{dklm})$: Función de green para un

lugar dado "x", en un tiempo "t-t_{elm}-t_{dklm}" determinado cuyos subíndices indican qué subfalla activar y en qué instante. El plano de falla está dividido en NL x NM subfallas y la fuente sísmica en ND intervalos de tiempo.

En zonas de subducción, como Chile, Ordaz et al (1995) trabajaron en un esquema aleatorio de sumas de funciones de green para estimar movimientos fuertes del suelo. Por otro lado, Kamae y Kawabe (2004) trabajaron en el evento de Japón del 2003, Tokachi-Okii Magnitud 8.0 según Japan

Meteorological Agency (JMA). Nozu e Irikura (2008) hacen una inversión de la forma de onda con funciones de green empíricas. La nomenclatura usada indica que el evento a modelar se llamará “Target”, mientras que el de menor magnitud que servirá como función de green será denominado “Semilla”. En este trabajo se validará el método usando un target de magnitud Mw6.2 usando una semilla Mw5.1. Luego se estudiará la sensibilidad del método para una semilla lejos del target con una semilla Mw5.4 y un target Mw6.5. A continuación se estudiará dos eventos Mw5.0 y Mw5.2, y se estudiará la implicancia de tener dos semillas posibles. Finalmente se modelará el evento Mw7.6 de abril 2014, a partir de dos semillas Mw6.1 y Mw3.5.

2 Metodología y resultados

Irikura(1983,1986) plantea que las semillas deben estar contenidas en el plano de ruptura del evento target a modelar. Para modelar un evento se parametriza en primer lugar un plano de falla dividida en una cantidad determinada de subfallas cuya área tiene relación con la magnitud de un evento pequeño que será utilizado como función de green. Este plano está caracterizado por un strike y dip propios del evento a modelar.

Para escoger un evento pequeño o semilla como función de green, es recomendable que tenga un mecanismo similar al evento a modelar o target.

Las subfallas son perturbadas temporalmente de acuerdo a una función de slip, que determina la magnitud de deslizamiento de cada subfalla y el instante de perturbación.

2.1 Metodología para una semilla Mw5.1 cercana al target Mw6.2

Se simula los registros en velocidad del evento Mw6.2 usando datos del evento Mw5.1, Figura 1 y Tabla 1. Los datos fueron filtrados entre 0.05 y 10 Hz para luego ser integrados a desplazamiento.

Se hizo una modelación forward usando un área de 2.5 km x 2.5 km, dividida en 5x4 subfallas. El frente de onda se considera circular con una velocidad de ruptura de 2.3 km/s y se usaron registros en velocidad integrados, filtrados en la banda de frecuencia de 0.05 -10 Hz.

Tabla 1. Eventos de validación del método de Irikura

año/ms/día/hr/mn	Magnitud	Dip/Rake/Strike
2014/04/11/00/01	Target	6.2
2014/04/14/05/56	Semilla	5.1

Los resultados son divididos en diferentes zonas, que aquí son llamadas Líneas explicitadas en la Figura 1.

Existen zonas nodales, las cuales consisten en puntos geográficos donde las ondas P y/o S presentan menor amplitud. Las amplitudes de estas ondas simuladas son sensibles en zonas nodales, como por ejemplo las estaciones cercanas a la Línea 1 de la Figura 1, PB03, PB04 y PB05, que fueron difíciles de modelar debido a encontrarse en dicha zona.

Las otras líneas de la Figura 1 muestran un buen ajuste en la señal y concuerda con el hecho de no encontrarse en zonas nodales. Las ondas superficiales son bien reproducidas y además se identifica el avance de ellas a medida que la distancia hipocentral aumenta.

En este caso el evento de menor magnitud fue sumado 20 veces para lograr reproducir el evento target. A pesar de que la magnitud indica que la diferencia entre ellos es mayor, esto pone en evidencia que los esfuerzos entre el target y la semilla es distinto, por lo tanto el valor de C en la ecuación (1) en este caso es distinto de 1.

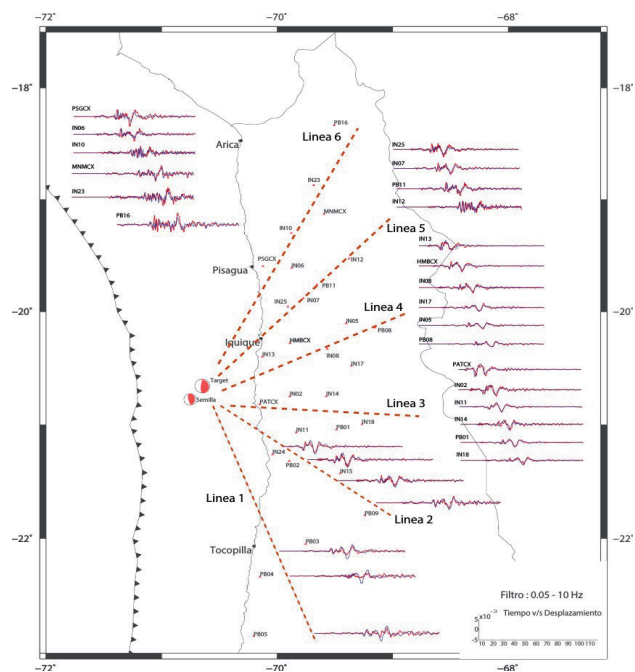


Figura 1. Resultado para una semilla cerca del target. Componente vertical.

2.2 Semilla lejos al target

Usando el mismo procesamiento de datos descrito en la sección 2.1 (banda de frecuencia, sismogramas integrados, velocidad de ruptura y frente de ruptura circular), en este caso el target de magnitud Mw6.5, es modelado con una semilla Mw5.4 (Figura 2 y Tabla 2). Se observa la influencia de escoger 2 eventos ubicados más lejos que en la sección 2.1, con similar mecanismo focal.

Tabla 2. Eventos de análisis de sensibilidad del método

año/ms/día/hr/mn	Magnitud		Dip/Rake/Strike
2014/04/03/01/58	Target	6.5	30/95/5
2014/04/03/09/23	Semilla	5.4	50/90/170

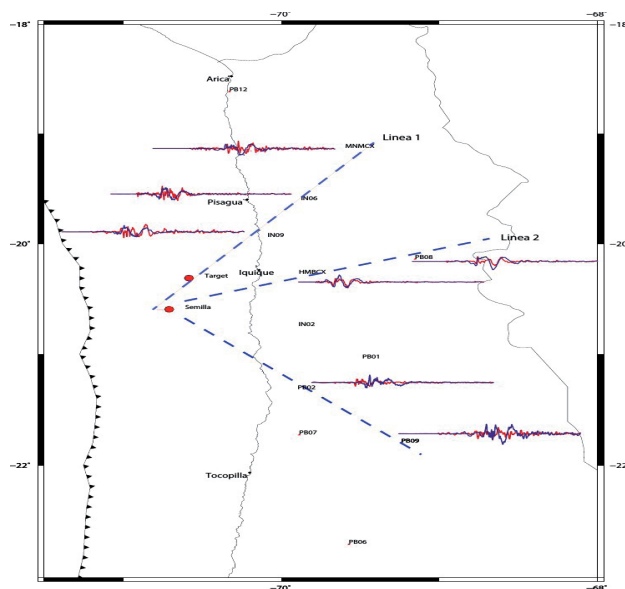


Figura 2 . Resultado para una semilla lejana al target. Los sismogramas integrados de la componente vertical. Es posible ver que ya los sismogramas integrados no son comparables variando el azimuth.

La grilla utilizada es de 2.5x2.5 km² pero la cantidad de subfallas varió a 9, lo que indica nuevamente que el factor C incide y muestra una diferencia en las caídas de esfuerzos.

Las estaciones PB01 y PB09 muestran un desajuste debido a que las distancias hipocentrales a cada evento son muy distintas.

Por otro lado, para las estaciones cercanas a la Línea 2, PB08 y HMBCX, las distancias hipocentrales son similares y por lo tanto, sus ondas se parecen pero PB08 ya comienza a ver diferencia, contrario a lo visto en la sección 2.1, Línea 4.

Finalmente las estaciones asociadas a la Línea 1 también muestran desajustes e inconsistencias debido a la diferencia de las distancias hipocentrales.

2.3 Sensibilidad de latitud

En esta sección se observa la diferencia entre dos posibles semillas ubicadas a poca distancia entre sus hipocentros y

mecanismos focales similares. Los eventos a comparar son Mw5.2 y Mw5.0 usando sismogramas integrados para la misma banda de frecuencia de las secciones 2.1 y 2.2, ver Tabla 3 y Figura 3.

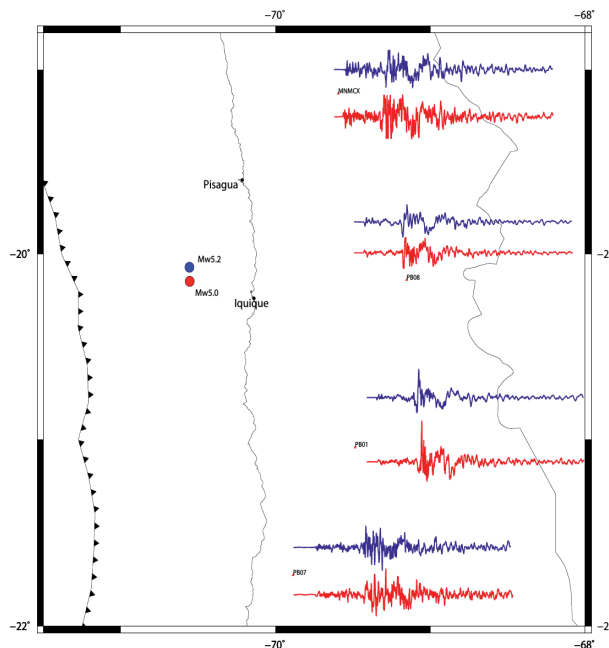


Figura 3. Se comparan las formas de onda de dos eventos de similar magnitud en la componente vertical. Ambos son candidatos a ser semilla de un evento mayor, pero las formas de ondas son cruciales al momento de sumar en un plano de falla. La elección de las estaciones es para tener la mayor cobertura azimuthal.

Tabla 3. Eventos de análisis de elección de semillas

año/ms/día/hr/mn	Magnitud		Dip/Rake/Strike
2014/04/05/05/44	Target	5.2	60/85/165
2014/04/11/12/00	Semilla	5.0	15/55/205

Como se muestra en la Figura 3, tener dos semillas de magnitud similar, pero con mecanismos no exactamente iguales, a diferente latitud muestra una diferencia en las formas de onda. En este caso las ondas superficiales no son iguales pero si son comparables las duraciones de ambos eventos.

2.4 Modelación de un evento Mw 7.7

En esta sección se simularán los registros en aceleración filtrados en un rango de 0.1-10 Hz.

La sección verde de la Figura 4 es el plano de falla

dividido en subfallas donde las asperezas fueron simplificadas considerando dos elipses. La estrella representa el hipocentro del evento Mw7.6 y los otros puntos indican las semillas más cercanas para cada aspereza.

Se estima un modelo de slip tal que la aspereza poniente tiene un deslizamiento de 2.8 m., mientras que la aspereza oriente de 4.5 m. Además se simplifica un frente de ruptura circular con velocidad de ruptura 2.3 km/s.

El valor de C considerado es 3 lo que implica que la caída de esfuerzos del target es menor que de las semillas.

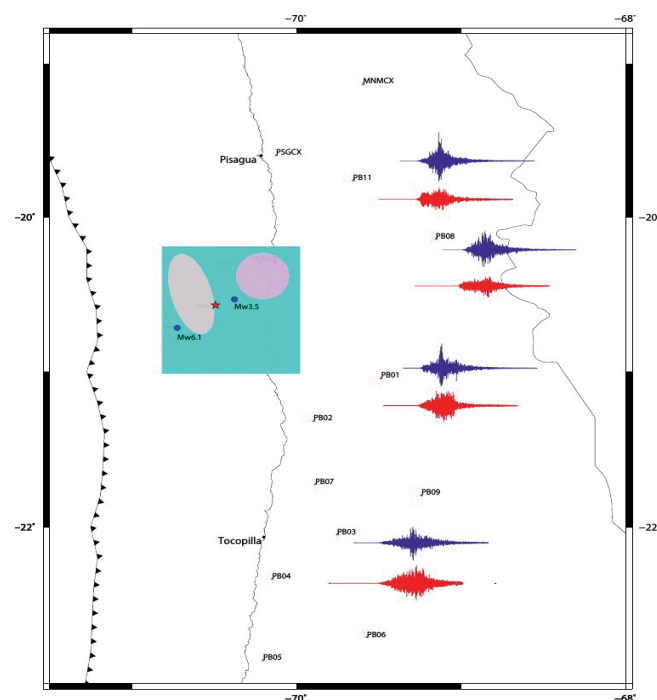


Figura 4. Acelerogramas observados (azul) versus sintéticos (rojos). Se muestra un subgrupo con amplia cobertura azimutal.

Se observa que la forma y amplitudes de aceleración se reproducen adecuadamente, en contraste con lo que se obtuvo en las simulaciones de desplazamiento, las cuales no fueron óptimas.

3 Discusión

El método de Irikura (1983) funciona satisfactoriamente para eventos de magnitudes menores. Un evento Mw6.2 puede considerarse puntual y usando una semilla Mw5.1 cercana al hipocentro se logra modelar las formas de onda de desplazamiento. De todas formas, las zonas nodales presentan un problema de ajuste como se ve en la Figura 1 Línea 1 y sus estaciones cercanas.

El hecho que el método sea sensible ante las distancias target-semilla (sección 2.2), hace que una modelación de un terremoto de área grande (decenas y centenas de kilómetros) se complique si no existen réplicas dentro del área de ruptura.

Pequeñas diferencias en los mecanismos de los eventos muestran formas de onda diferentes como se muestra en la Figura 3. Estas diferencias podrían escalar y sesgar el resultado de la modelación final.

Descartándose la posibilidad de reproducir las formas de onda en desplazamiento, es importante agregar que los valores de aceleración máxima de los acelerogramas son comparables, y es como se ve en la Figura 4.

Por lo tanto se concluye que es posible reproducir acelerogramas desde un aspecto amplio, como su valores de aceleración máxima, formas de envolvente y su duración.

Se destaca que la modelación del evento Mw7.7 se hizo considerando dos asperezas bien definidas con un valor constante de slip. Las semillas utilizadas son las más cercanas a cada aspereza pero, como se ve en la sección 2.3, podrían no representar a cabalidad una función de green para cada subfalla de la aspereza. Sin embargo se simulan de buena forma los acelerogramas.

Referencias

- Aki, K. 1968. Seismic Displacements near a Fault, *J. Geophys. Res.*, Vol. 73, 1968, pp. 5359-5376.
- Hartzell, S. and Helmberg, D. 1982. Strong Motion Modeling of the Imperial Valley Earthquake of 1979, *BSSA*, Vol. 72, 1982, pp. 571-596
- Haskell, N.A., 1969; Elastic Displacements in the Near-Field of a Propagating Fault, *BSSA* Vol. 59, 1969, pp. 865-908
- Irikura, K., 1983. Semi-empirical estimation of strong ground motions during large earthquakes, *Bull. Disas. Prev. Res. Inst.*, 33, 63-104.
- Irikura, K., 1986. Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, *Proc. 7th Japan Earthq. Eng. Symp.*, Tokyo, 151-156
- Kamae and Kawabe, 2004. Source model composed of asperities for the 2003 Tokachi-oki, Japan, earthquake estimated by empirical Green's function method, *Earth, Planets and Space*, Vol.56, Issue 3, pp 323-327.
- Nozu, A. and Irikura, K., 2008. Strong-Motion Generations Areas of a Great Subduction-Zone earthquake: Waveform Inversion with Empirical Green's Function for the 2003 tokachi-oki Earthquake. *BSSA*, Vol. 98, 2008, pp. 180-197.
- Ordaz et al. 1995. A scheme of random Summation of an Empirical greens's Function to Estimate Ground Motions from Future Large Earthquakes, *BSSA*, Vol.85, 1995, pp 1635-1647