

Modelado cinemático de la fuente sísmica en 2D con ondas de volumen telesísmicas (Guía de Usuario)

J.M. Gómez-González¹, C. Mendoza¹, S. Hartzell² y T. Heaton³

¹Centro de Geociencias, Campus UNAM-Juriquilla, Blvd. Juriquilla 3001, Querétaro 76230, Qro.

gomez@geociencias.unam.mx

²U.S. Geological Survey, Denver Federal Center, Denver CO 80225, USA

³California Institute of Technology, Pasadena, CA

Resumen

Ponemos a disposición de la comunidad interesada en la Sismología los programas de inversión y modelado de falla finita. Se trata de un método lineal de inversión de ondas P y SH registradas a distancias telesísmicas. El método utiliza una serie de ventanas de tiempo para describir las características espacio-temporales de la fuente sísmica. Dichas ventanas permiten extraer la duración del desplazamiento en cada punto de la falla. El análisis cinemático de los parámetros de la fuente sísmica ha permitido examinar detalladamente la distribución del desplazamiento cosísmico sobre el plano de falla de varios terremotos de California, México y Sudamérica, entre otros. Dada la utilidad de estos programas de inversión en dos dimensiones nos interesa difundir e incentivar su uso entre la comunidad latinoamericana. Incluimos los datos reales y la inversión completa de un sismo. Con ello el lector podrá reproducir dicha inversión y comparar sus resultados con los nuestros. El programa modela fallas planas simples. Para ello requiere de un modelo físico de corteza, el cual influye en la calidad de la solución. Describimos los pasos esenciales para usar los programas. Su uso correcto permitirá aprovechar la gran cantidad y calidad de datos proporcionada por el creciente número de estaciones sísmicas alrededor del mundo. Incluimos una breve descripción de los códigos, archivos de datos y comandos utilizados en la inversión. La mayoría de los códigos están escritos en lenguaje FORTRAN, se pueden compilar sin mayor dificultad en sistemas operativos como UNIX o LINUX

1. Introducción

La inversión de la fuente sísmica proporciona información sobre el origen, evolución y distribución espacio-temporal del proceso de ruptura. Para ello se pueden modelar ondas de volumen registradas típicamente a distancias telesísmicas o regionales (Hartzell, 1989; Utkucu et al., 2002; Dreger, 2003; Zahradnik et al., 2008; Hsieh et al., 2014). La cinemática de la ruptura se puede estudiar desde una aproximación de fuente puntual (Nábélek, 1984; Dreger, 2003; Gómez-González et al., 2010) o de falla finita (Hartzell y Heaton, 1983, 1986; Mendoza et al., 2011). Los estudios de fuente puntual (FP) proporcionan una estimación de la profundidad

de la fuente, del mecanismo focal, de la duración de la función temporal de la fuente y del momento escalar. En el modelado de falla finita (FF) el hipocentro y mecanismo focal suelen tomarse de las determinaciones hechas por alguna agencia, aunque eso no excluye que éstos se puedan refinar durante la inversión. También se estima el momento escalar, la velocidad de ruptura, la duración de la fuente y la evolución del deslizamiento sobre el plano de falla. En los estudios de FF a estos dos últimos parámetros se les analiza con mayor detalle (Hartzell y Heaton, 1983, 1986; Mendoza et al., 2011; Mendoza y Hartzell, 2013).

Con la llegada de los instrumentos de banda ancha se incrementó la cantidad y calidad de datos. Ello ha permitido una amplia disponibilidad de registros sísmicos digitales, lo que a su vez ha facilitado estudios más detallados de la historia de la ruptura de los terremotos a escala global (Mendoza y Hartzell, 2008; Hsieh et al., 2014). Con ello ha mejorado nuestro conocimiento de la fuente sísmica y del proceso de generación y evolución de los sismos. Sin embargo, el aumento de investigaciones de FF no implica que la comunidad que usa los códigos de inversión sea necesariamente muy grande. De hecho en Latinoamérica sigue siendo pequeña. Por ello ponemos a disposición de la comunidad científica los programas de modelado de FF en dos dimensiones. En este documento ofrecemos una descripción sucinta de los códigos, archivos de datos y comandos utilizados en la inversión, así como un ejemplo de prueba que describe las características de los archivos de entrada, las señales analizadas y los archivos de salida. La mayoría de los códigos están escritos en FORTRAN, mientras que algunas secuencias de comandos están escritas en C-shell. El conjunto está listo para compilarse en los sistemas operativos UNIX o LINUX.

La metodología de inversión de FF que aquí se describe fue desarrollada por Hartzell y Heaton (1983; 1986). Se utiliza una parametrización cinemática de la falla para simular la distribución simple del deslizamiento cosísmico. Esto permite reproducir las formas de onda sísmicas generadas durante un sismo. El método se ha utilizado en el estudio de sismos grandes para modelar sismogramas registrados a distancias de entre 30° y 90° (Hartzell y Heaton, 1983, 1986; Mendoza et al., 2011; Mendoza y Hartzell, 2013). En este intervalo disminuyen considerablemente efectos indeseables como triplicaciones y ondas difractadas en el núcleo externo (Lay y Wallace, 1995; Stein y Wysession, 2003), ello facilita el modelado de prácticamente cualquier sismograma. La simulación del

deslizamiento requiere conocer la geometría de la fuente. El conjunto de programas de FF permite analizar prácticamente todo tipo de fallas planas simples. Una vez que se conocen las características espaciales de la falla, se realiza su parametrización. Ello incluye el cálculo de las funciones de Green de las fuentes puntuales de todas y cada una de las subfallas que componen el plano de falla (Figura 1), las cuales se requiere conocer con precisión. La inversión se encarga de estimar la duración y velocidad de la ruptura, entre otros parámetros (Hartzell y Heaton, 1983; 1986). Para ello se requiere de un modelo físico de corteza, el cual influye en la calidad de la solución.

Por otro lado, el uso práctico de los programas de inversión puede no ser trivial. Reconocemos que en general al utilizarse programas de cómputo de otros autores es común encontrar dificultades, ya sea en su compilación o en su instalación en el sistema operativo que se trabaja, debido a la falta de algunas bibliotecas, la omisión de algunas definiciones, etc. La dificultad puede aumentar al tratar de comprender la estructura interna de los códigos. Es posible que sean poco claros o poco amigables en su descripción o secuencia de uso. Por su parte, la falta de información en la introducción de parámetros representa la confrontación de la funcionalidad de los algoritmos con la posibilidad de obtener soluciones físicamente válidas. Por si fuera poco, la dificultad puede aumentar si durante el análisis de un evento específico surgen dudas. No siempre es sencillo obtener asesoría a distancia, y de lograrla no siempre ésta será muy efectiva, básicamente porque el autor de los códigos desconoce la secuencia que ha seguido el usuario durante su análisis. Tampoco es sencillo identificar o entender si la dificultad proviene de un error en los programas o en la forma en que se han procesado los datos.

Esta guía busca entonces ayudar a reducir algunas dudas. El documento contiene los elementos

básicos para utilizar los programas de inversión y modelado de ondas sísmicas en 2D. Se incluye una inversión completa con datos reales. Con ello buscamos facilitar la comprensión entre la teoría y la aplicación de la misma. Los programas de inversión, junto con un ejemplo de prueba con datos reales y la versión de esta guía en inglés se pueden encontrar en el portal de GITHUB del USGS (<https://github.com/usgs/finite-fault>). Los mismos programas, junto con esta guía en español, también se pueden obtener en el portal del Boletín Virtual Bol-e del Centro de Geociencias de la UNAM (<http://www.geociencias.unam.mx/~bole/bole/page2/page33/page33.html>). Con ello el usuario podrá explorar el uso de los programas, tratar de reproducir las inversiones y autoevaluar la calidad de sus resultados.

Recomendamos al usuario aprender a construir e interpretar mecanismos focales. También es importante que tenga nociones de procesamiento digital de señales y conozca el significado de un tensor. Para hacer la lectura más fluida los acrónimos se definirán al final del texto, citándolos con sus respectivas ligas.

2. Esquema de la Inversión

El método utiliza una falla plana rectangular, cuya orientación está predefinida por el mecanismo focal de la fuente sísmica reportado por alguna agencia (v. gr. USGS, ERI). La falla se divide en una malla regular de subfallas (Figura 1) y debe ser lo suficientemente grande para albergar el deslizamiento cosísmico esperado. El hipocentro del terremoto se coloca en una posición y profundidad adecuada dentro del plano de falla. Cada subfalla se compone de una serie de fuentes puntuales distribuidas de manera uniforme (Figura 1). El conjunto de subfallas se distribuyen a lo largo y ancho del plano de falla (Hartzell y Heaton, 1983; 1986; Mendoza, 1994). La función de Green de cada fuente puntual se calcula para todas y cada una de las estaciones disponibles utilizando un modelo de corteza predeterminado,

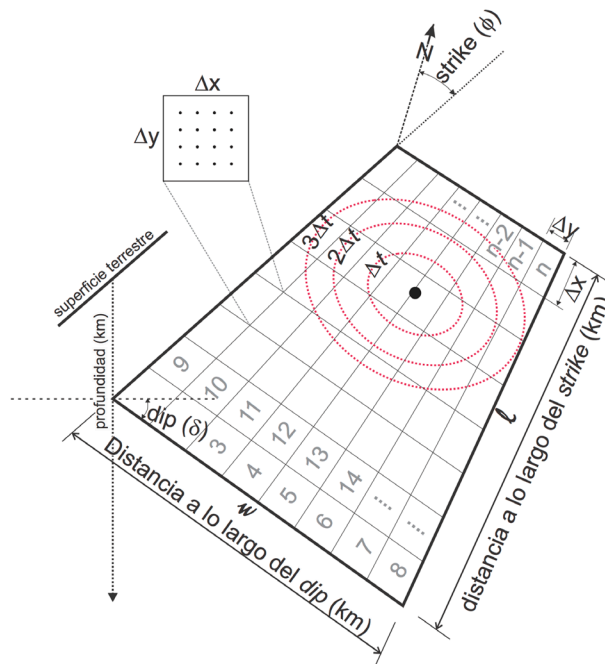


Figura 1. Descripción espacial de la geometría de la falla en profundidad. Se muestra la malla compuesta por las subfallas, cada una definida por Δx y Δy , para el modelado de falla finita. Cada subfalla está definida por un conjunto de fuentes puntuales para generar los desplazamientos al interior de ellas. El punto negro corresponde a la localización del hipocentro sobre la falla; los círculos concéntricos (líneas punteadas en rojo) indican un frente de onda en diferentes tiempos (Δt).

y una “boxcar” (función rectangular o “caja”) de duración finita como función temporal de la fuente puntual.

El método permite estimar el deslizamiento cosísmico de un “rake” (ángulo de deslizamiento) fijo o variable. En el primer caso, las funciones de Green se calculan para un mecanismo focal conocido del sismo. Si se requiere trabajar con un rake variable se calculan dos conjuntos separados de funciones de Green: uno para una falla “dip-slip” (normal o inversa) pura, y otro para la componente “strike-slip” (transcurrente) pura del ángulo de deslizamiento. Por ejemplo, si se espera que el ángulo de deslizamiento de un sismo sea de alrededor de 45° , entonces las funciones de Green se calculan para un rake de 0° y 90° . La inversión calcula la contribución del deslizamiento en la falla de cada componente,

con la identificación de la variabilidad en los ángulos de deslizamiento a lo largo de la falla. Como se verá más adelante, esto necesariamente duplica el número de incógnitas en el problema inverso que se quiere resolver.

Las funciones de Green de cada fuente puntual, en cada subfalla, se suman para producir los respectivos sismogramas sintéticos correspondientes en cada sitio de registro. El procedimiento considera el tiempo de retraso provocado por la propagación de la ruptura a una velocidad específica desde el hipocentro. La figura 2 esquematiza la parametrización para una falla rectangular de 255 km de largo y 165 km de ancho, dividida en 187 subfallas cuadradas de 15 km por 15 km. En este caso usamos una velocidad de ruptura de 3 km/s para calcular los sintéticos de las subfallas. Por convención las fallas se enumeran consecutivamente siguiendo el echado de la falla de arriba hacia abajo, siguiendo el rumbo de la misma (Figuras 1 y 2).

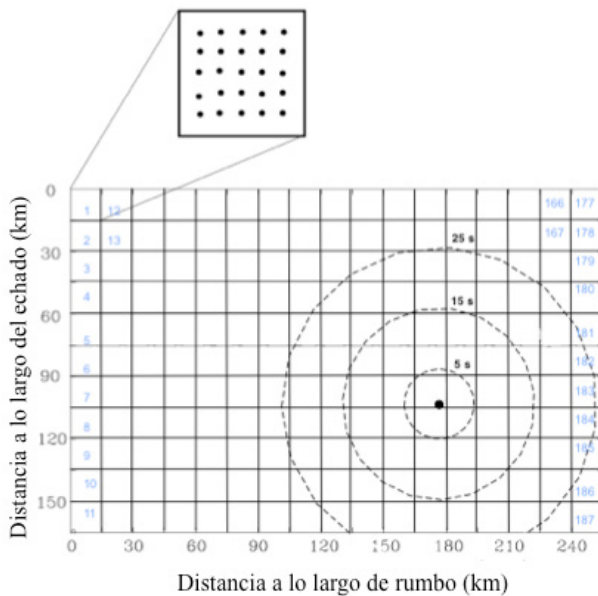


Figura 2. Descripción espacial de la geometría de la falla y su subdivisión en subfallas para el modelado de FF. Falla rectangular de 255 km de largo y 165 km de ancho, dividida en 187 subfallas cuadradas de 15 km por 15 km. Se usa una velocidad de ruptura de 3 km/s para calcular los sintéticos de las subfallas.

El problema por invertir se construye uniendo los sismogramas sintéticos desde un extremo de la falla hasta el otro, para todas las estaciones, y así conformar las columnas de una matriz **A** de coeficientes que contiene los sintéticos de las subfallas. Los sismogramas observados igualmente se unen de extremo a extremo en un vector de datos **b** para conformar un sistema sobredeterminado de ecuaciones lineales $C_d^{-1}Ax = C_d^{-1}b$, donde C_d^{-1} es una matriz de covarianza de datos que normaliza las amplitudes de los registros observados a un valor máximo unitario de 1. Los elementos del vector solución **x** corresponden al deslizamiento necesario en las subfallas para reproducir las observaciones normalizadas $C_d^{-1}b$.

2.1 Ventanas

La inversión usa una aproximación de ventanas de tiempo para discretizar en las subfallas el “rise time” (tiempo de dislocación) y el “rupture time” (tiempo de inicio) durante el deslizamiento. Esto se logra mediante la generación de un conjunto adicional de sismogramas para cada subfalla, con sismogramas sintéticos retrasados en tiempo por la duración de la “boxcar source-time function” (función rectangular temporal de la fuente) utilizada para calcular las funciones de Green iniciales. El número de veces que los sintéticos de las subfallas son retrasados representa por lo tanto, el número de ventanas de tiempo que se utilizarán en la inversión. Este proceso de ventanas de tiempo aumenta el número de incógnitas en el problema lineal, y se utiliza el procedimiento de inversión para resolver la contribución del deslizamiento en cada una de las ventanas de tiempo “prescritas”; ello permite un rise time variable, así como una relajación de las restricciones de una velocidad de ruptura fija. Por ejemplo, si se usa una boxcar de 2 s de duración para construir los sintéticos de las subfallas de la figura 2, y estos sintéticos se retrasan cinco veces por los 2 s del ancho de la boxcar (correspondiente a 5 ventanas de

tiempo), entonces la inversión permitiría un rise-time de hasta 10 segundos en cada subfalla, si así fuera requerido por las observaciones. De igual forma, el tiempo de ruptura en cualquier subfalla podría ser retrasado hasta 8 s, relativo al tiempo requerido por una ruptura propagándose a una velocidad constante. En este sentido, la velocidad de ruptura usada para calcular las funciones de Green originales corresponde a la velocidad máxima permitida en la inversión. Nótese que el número de incógnitas aumenta por un factor correspondiente al número de ventanas de tiempo. En el ejemplo de la figura 2 el número de incógnitas se incrementa de 250 a 1250 cuando se utilizan cinco ventanas de tiempo en la inversión. Esto provoca que las dimensiones de los arreglos de vectores que se usan se tengan que ajustar en cada inversión.

2.2 Estabilidad y Positividad

El problema inverso se estabiliza añadiendo ecuaciones de restricción al sistema lineal, de la forma

$$\begin{bmatrix} C_d^{-1}A \\ \lambda F_1 \\ \lambda F_2 \end{bmatrix} x = \begin{bmatrix} C_d^{-1}b \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

donde \mathbf{A} , \mathbf{x} , \mathbf{b} y C_d^{-1} son la matriz de coeficientes, el vector solución, el vector de datos y la matriz de covarianza definidos anteriormente. F_1 corresponde a la diferencia en deslizamiento entre subfallas adyacentes, lo que impone una transición suave del deslizamiento entre las subfallas. Por su parte F_2 es la matriz identidad, y su presencia reduce la longitud del vector \mathbf{x} , minimizando efectivamente el momento sísmico total. El valor del factor de ponderación escalar λ controla el compromiso (trade-off) entre la aplicación de las restricciones y el ajuste de las observaciones.

Ambas restricciones comúnmente se aplican simultáneamente utilizando el mismo valor de λ . El vector solución \mathbf{x} se obtiene utilizando el

esquema de inversión de mínimos cuadrados no negativos (NNLS) de Lawson y Hanson (1974). Este esquema tiene una restricción de positividad en la que los pesos del deslizamiento, inferidos en las subfallas, sólo permiten valores positivos. Esto elimina la posibilidad de ocurrencia de deslizamientos negativos a lo largo de la falla, los cuales pueden dar lugar a una interferencia destructiva indeseable entre las subfallas.

La versión original del programa de inversión requiere de múltiples corridas secuenciales utilizando valores incrementales de λ para obtener un valor óptimo que identifique la solución más simple posible. Este procedimiento generalmente involucra una inspección visual de los ajustes de las formas de onda después de cada inversión, como se describe más adelante en la sección 6, y resulta en un solo peso derivado empíricamente que identifica el modelo de deslizamiento inferido para el sismo. El sistema lineal corresponde a un problema inverso tipo Tikhonov, cuya solución puede derivarse a partir de un análisis más cuantitativo de curva L (Hansen, 1998). Dicho análisis identifica el equilibrio entre el ajuste de los datos y el cumplimiento de las restricciones de estabilización. Mendoza y Hartzell (2013) evaluaron este análisis de curva L mediante el uso de ondas P telesísmicas registradas para varios eventos grandes. Ellos encontraron que se puede estimar un peso λ , cercano al valor óptimo, a partir del promedio de los valores absolutos de los elementos de la matriz de coeficientes $C_d^{-1}\mathbf{A}$. Ello simplifica la inversión, pues a partir de este peso λ pre-estimado se puede recuperar la historia de la ruptura del terremoto en un solo paso. Esto es útil si se requiere, por ejemplo, obtener soluciones relativamente rápidas y confiables de sismos importantes cuando se tiene acceso a las formas de onda en tiempo real. Ambas inversiones, de estimación clásica de λ , y de pre-estimación automática de λ , se describen en este documento.

3. Códigos de Inversión

Para el análisis de falla finita se requiere ejecutar varios programas de cómputo que leen los datos observados, generan los sintéticos de las subfallas y realizan la inversión (Figura 3). En la secuencia de los códigos los programas CADIN y CADLAC generan los sintéticos de las subfallas, mientras que TELMOD permite procesar los registros de datos observados y sintéticos. El programa JULIEW organiza las observaciones y sintéticos para realizar la inversión. Mientras que el programa LISA lleva a cabo propiamente la inversión lineal. Finalmente, el programa PLISA lee los resultados de la inversión y recupera la distribución del deslizamiento sobre la falla para ser graficados. Estos y otros códigos suplementarios útiles se describen de forma particular en las secciones siguientes (ver Figura 3).

4. Datos de la Forma de Onda

Para llevar a cabo el análisis telosísmico de falla finita, los datos crudos registrados del terremoto que se pretende analizar se obtienen inicialmente de una base de datos global, como el repositorio de formas de onda continuas (CWB, por sus siglas en inglés) del USGS/NEIC (United States Geological Survey/National Earthquake Information Center) o los repositorios del *Incorporated Research Institutions for Seismology* (IRIS). Las bases de datos del CWB están a disposición de la comunidad científica a través de servidores de clientes dedicados, allí se almacenan poco después de que se registran en las diversas estaciones mundiales. Para obtener información sobre la recuperación de datos de la CWB los usuarios pueden consultar la documentación del USGS/NEIC (<ftp://hazards.cr.usgs.gov/CWBQuery/CWBQuery.doc>). Los datos de IRIS están generalmente disponibles a través de su sitio web (<http://ds.iris.edu/ds>); para ello existe una gran variedad de herramientas de recuperación de datos.

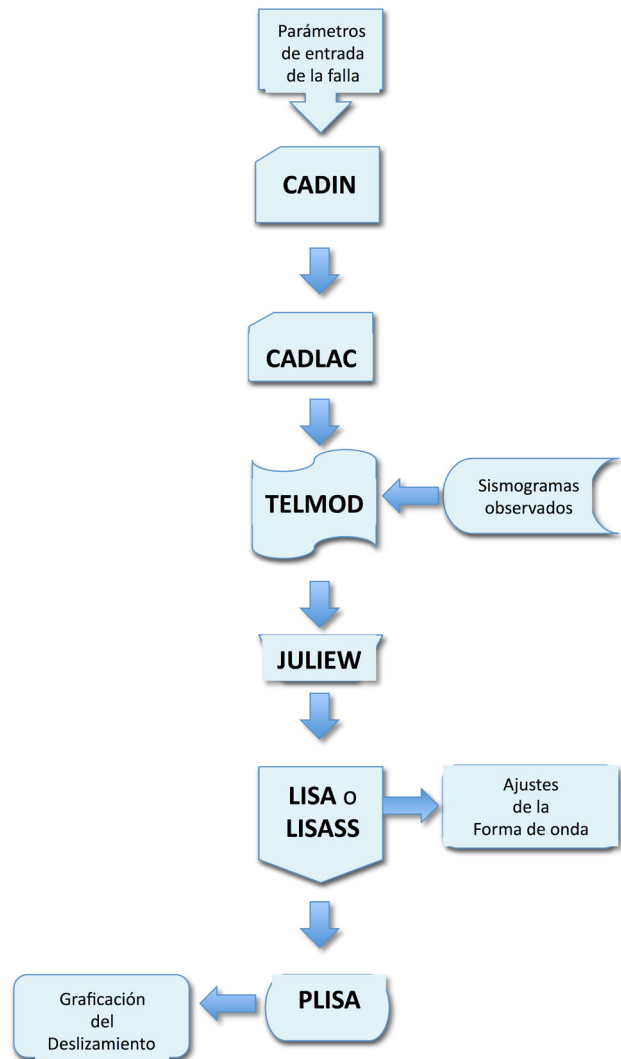


Figura 3. Secuencia de utilización de los programas para el modelado de Falla Finita (FF), los cuales se pueden obtener en: www.geociencias.unam.mx/~bole/bole/page2/page33/page33.html.

Se omiten en este documento los procedimientos de recuperación y procesamiento de datos, ello debido a que éstos pueden variar según sea el centro del que se obtienen dichos datos, así como del tipo de análisis de señales que requieran aplicar los usuarios. En el caso de los ejemplos que se incluyen en esta guía, los datos sísmicos crudos obtenidos provienen de diferentes centros de acopio. La mayoría de ellos

se obtuvieron en formato SAC (Seismic Analysis Code, Goldstein et al., 2003). Este formato tiene la ventaja de que para su procesamiento existen varias rutinas y scripts disponibles en el portal de IRIS. Una vez procesados los datos, éstos deben transformarse y almacenarse en un archivo en formato binario en el orden requerido por el programa TELMOD. Los códigos están diseñados para invertir amplitudes del movimiento del terreno en velocidad o desplazamiento, de modo que el usuario debe modificar los registros según el tipo de inversión que quiera realizar. Se debe de recordar eliminar la respuesta instrumental de las señales antes del análisis de la forma de onda. Las unidades de las amplitudes de los registros reales deben ser compatibles con las de los sintéticos (ver Sección 5).

Para la inversión de los sismogramas, su tiempo de inicio se puede marcar en el arribo de la onda de cuerpo o en algún tiempo fijo conocido antes de dicho arribo. El tiempo de inicio del registro se puede ajustar numéricamente más tarde con el programa TELMOD (ver más abajo). De ser necesario invertir más de un tipo de datos simultáneamente (por ejemplo, ondas P y SH), entonces se debe preparar un archivo por cada tipo de onda, ya que los sintéticos para los diferentes tipos de datos se construyen por separado. Los archivos se pueden unir posteriormente, antes de la inversión, utilizando el programa CONCAT para crear un solo archivo que contenga las observaciones y los sintéticos que pueden ser leídos por los códigos de inversión. Es preciso aclarar que los registros deben ser lo suficientemente largos para contener todo el intervalo de tiempo a invertir.

4.1 Programa TELMOD

Este programa se ejecuta interactivamente y se usa para procesar tanto los sismogramas observados como los sintéticos. Cuando se procesan datos observados, el código ofrece las siguientes opciones:

1. Eliminar el promedio de las amplitudes de los registros de datos.
2. Filtrar los registros usando un filtro pasa bandas de Butterworth. Considere que cualquier filtro que se aplique a los datos observados se debe aplicar igualmente a las formas de onda sintéticas (ver Sección 5).
3. Eliminar el comienzo de cada registro por una longitud de tiempo definida para alinear adecuadamente los datos observados con los sintéticos. Esta eliminación no es necesaria si el archivo de datos ya contiene registros que empiezan en los arribos de las ondas de cuerpo. Sin embargo, puede requerirse ejecutar TELMOD de nuevo y volver a realizar la inversión si se necesitan ajustes de tiempo para identificar el modelo de deslizamiento más adecuado.
4. Interpolan los registros a un intervalo de tiempo común.
5. Modificar la polaridad de cualquier registro deseado.

5. Sismogramas sintéticos de las subfallas

Los sismogramas sintéticos de las subfallas, para el problema de inversión de datos telesísmicos, se construyen utilizando el programa CADLAC para una estructura de corteza en capas. Éste programa utiliza la teoría generalizada de rayos (Langston y Helmberger, 1975), la cual calcula la respuesta sísmica para fuentes puntuales distribuidas a lo largo y ancho de cada subfalla, para luego sumar las respuestas que permitan construir las señales sintéticas de cada subfalla. El cálculo de la respuesta sísmica toma en cuenta la propagación de la ruptura a una velocidad constante predefinida. La teoría considera la incorporación de reflexiones internas y conversiones de modos dentro de una estructura cortical estratificada, permitiendo así la contribución de las fases de profundidad (pP, sP, sS, pS) en la respuesta telesísmica. CADLAC lee una serie de archivos que contienen los rayos

ubicados en una carpeta nombrada RAYS. La ruta de acceso a dicha carpeta está explícitamente definida dentro del código, y el usuario debe verificar que ésta ruta coincida con la ubicación real de la carpeta RAYS en el disco duro antes de compilar CADLAC. Debido a que el código puede resultar relativamente complicado de seguir en su estructura para entender el formato en el que se deben introducir los datos, utilizamos previamente el programa CADIN para crear un archivo de entrada para CADLAC y así simplificar su uso, tal como se describe a continuación. Los sintéticos de las subfallas generados por CADLAC corresponden al desplazamiento del terreno en micras. Enseguida estos registros se procesan utilizando el programa TELMOD para prepararlos para la inversión. Si los registros de datos a invertir corresponden al movimiento del terreno en velocidad, entonces los registros sintéticos deben ser adicionalmente diferenciados en TELMOD para obtener unidades en micras/segundo, como se indica más abajo.

5.1 Programa CADIN

CADIN se ejecuta interactivamente y requiere varios parámetros de entrada, incluyendo las dimensiones y geometría de la falla, el número de subfallas y la velocidad de ruptura que se utilizará en la inversión. Ello produce los archivos siguientes:

1. *cadin.dat*: archivo ASCII utilizado como entrada a CADLAC.
2. *weight.dat*: archivo ASCII leído por CADLAC que contiene los pesos iniciales de la dislocación de la subfalla a lo largo del strike y el dip de la falla. Por defecto se establecen en 1.0 para todas las subfallas.
3. *arszcad.dat*: archivo ASCII que contiene una declaración PARAMETER utilizada por CADLAC para definir las dimensiones del arreglo para el problema particular de falla finita que se va a resolver. CADLAC debe ser compilado por separado para cada ejecución de inversión

utilizando el archivo *arszcad.dat* apropiado.

5.2 Programa CADLAC

CADLAC además de leer el archivo *weight.dat*, lee un archivo preexistente denominado *inlong.dat* o *inshort.dat* que especifica la duración del tiempo, el número de puntos y la tasa de muestreo de los sintéticos. Este archivo incluye los nombres, distancias, azimuts y parámetros de rayos de las estaciones que se quieren modelar, así como la especificación de la estructura estratificada de la corteza que se utilizara para generar los sintéticos. El archivo *inlong.dat* contiene datos telesísmicos de banda ancha o de período largo. El archivo *inshort.dat* se utiliza para analizar datos de período corto. Para ejecutar CADLAC, se compila primero el código usando el archivo de parámetros *arszcad.dat* correspondiente y luego se teclea:

```
cadlac < cadin.dat
```

para redirigir la entrada desde el archivo *cadin.dat*

CADLAC produce los siguientes archivos de salida:

- 1) *cadbin.dat*: Archivo binario que contiene los registros sintéticos calculados para cada subfalla en cada una de las estaciones listadas en el archivo *inlong.dat*.
- 2) *cadout.dat*: archivo ASCII que imprime los detalles de la ejecución CADLAC. Un parámetro importante enumerado en este archivo es la dislocación (en centímetros por unidad de peso) que corresponde al momento sísmico de entrada. Este valor, llamado factor de escala CADLAC (CSF por sus siglas en inglés), se requiere para más tarde recuperar el deslizamiento real en cada subfalla de los pesos de dislocación identificados en la inversión (ver Sección 7).
- 3) *cadarr.dat*: archivo ASCII que lista el primer arribo de la onda de cuerpo (en segundos) en

cada estación. Corresponden al tiempo entre el inicio de los sintéticos y el arribo de las fases P o S en la subfalla del hipocentro. Antes de la inversión, estos sismogramas sintéticos deben de ser alineados correctamente con las observaciones. El programa TELMOD permite realizar este ajuste en los sismogramas (ver abajo).

5.3 Programa TELMOD

Para los sismogramas sintéticos se utiliza TELMOD para realizar las siguientes tareas:

1. Filtrar los registros de las subfallas utilizando un filtro pasa bandas de Butterworth, si el filtrado se ha aplicado previamente a los sismogramas observados. Los parámetros del filtrado entre los datos observados y sintéticos deben ser los mismos.
2. Interpolarse a un intervalo de muestreo uniforme en el tiempo.
3. Derivar hacia la velocidad del terreno, en caso de que los sismogramas observados estén en velocidad.
4. Eliminar los tiempos *cadarr.dat* desde el extremo frontal de los sismogramas sintéticos en cada estación para alinearlos correctamente con las formas de onda observadas.

Es importante inspeccionar visualmente los sismogramas sintéticos antes y después de ejecutar TELMOD, ello para verificar que están siendo calculados y cortados correctamente, ya que puede haber importantes variaciones en el tiempo (v. gr., cuando los sintéticos de velocidad se cortan usando tiempos especificados en *cadarr.dat* basados en registros de desplazamiento de CADLAC). Después del procesado con TELMOD, el tiempo de inicio del registro sintético, calculado para la subfalla que contiene el hipocentro, debe corresponder a la llegada de la onda de volumen. Si no es así, los tiempos de *cadarr.dat* deben ajustarse manualmente en los momentos apropiados y TELMOD debe ejecutarse de nuevo.

El programa SYNPLT se puede utilizar para ver los sintéticos calculados para subfallas individuales o estaciones individuales. El programa utiliza llamadas de graficado del estilo CALCOMP y debe compilarse con una biblioteca apropiada. Incluimos una biblioteca de graficado CALCOMP, aunque es responsabilidad del usuario compilar e instalar correctamente las bibliotecas y/o hacer las modificaciones necesarias al código existente. Los registros podrían visualizarse alternativamente con cualquier otro código proporcionado por el usuario o rutinas para graficar adaptadas para leer formato binario.

6. Inversión de la forma de onda

La inversión de la forma de onda requiere que los archivos de datos observados y sintéticos estén colocados primero en el formato adecuado mediante el programa JULIEW, del mismo modo es necesario que se especifiquen las longitudes de registro y el número de ventanas de tiempo que se utilizarán en la inversión. JULIEW prepara dos archivos binarios: *juliea.dat*, que contiene los sintéticos de las subfallas y *julieb.dat*, el cual contiene las formas de onda observadas. Estos archivos son leídos por el programa LISA, que es el código que en realidad realiza la inversión usando la rutina NNLS de Lawson y Hanson (1974), teniendo en cuenta el suavizamiento espacial deseado y/o la minimización de momento prescrita por los factores de ponderación λ definidos por el usuario. Para identificar la ponderación adecuada que se requiere, se puede ejecutar LISA varias veces, de forma consecutiva utilizando diferentes valores de λ , la salida se examina en cada ocasión para confirmar el valor de entrada o ajustar el factor para las ejecuciones posteriores. En la práctica, esto se lleva a cabo ejecutando primero la inversión sin restricciones de estabilización para identificar el mejor ajuste esperado entre las formas de onda observadas y predichas. Posteriormente se realiza de nuevo la inversión varias veces, incrementando el valor λ en cada ocasión, hasta que las formas de

onda sintéticas ya no ajusten más los registros observados. Este es el número óptimo de iteraciones, más allá del cual los ajustes de las formas de onda se deterioran y ya no es posible reconocer el modelo más simple (Mendoza y Hartzell, 2013).

Alternativamente, se pueden trazar las normas residuales frente a las normas de suavizado de varias corridas para producir una curva L (Hansen, 1998), ello ayudaría a identificar el valor óptimo del peso λ del suavizado. Un ejemplo de este análisis de curva L para el problema inverso de falla finita se puede encontrar en Mendoza y Hartzell (2013). Si se desea, la inversión se puede realizar en un solo paso usando el programa LISASS, el cual utiliza un valor de λ estimado a partir de la matriz de coeficientes $C_d^{-1}\mathbf{A}$. Para ello el programa LISASS usa la relación empírica $\lambda = 90A_{avg}$ propuesta en Mendoza y Hartzell (2013), donde A_{avg} es el promedio de los valores absolutos de los elementos de la matriz de coeficientes.

Ambas versiones de LISA generan un archivo ASCII llamado *lisaout.dat*, éste contiene los pesos de dislocación de cada subfalla (vector de solución \mathbf{x}) necesarios para reproducir los registros observados. Ambos códigos, LISA y LISASS, deben ser compilados específicamente para el problema en cuestión, es decir, el problema debe ser dimensionado exactamente. Esto se hace usando el archivo de parámetros *arszlisa.dat*, donde:

$M = MDA =$ Número total de renglones en la matriz \mathbf{A}
 $N =$ Número total de incógnitas en la matriz \mathbf{A}
 $N3 = 327$ (siempre)

El número total de renglones M en la matriz \mathbf{A} está dado generalmente por:

$$M = M_{NP} + M_{RS} + M_{RM}$$

donde M_{NP} es el número total de puntos de todos los registros de datos; M_{RS} es el número de renglones agregados para el suavizado espacial y M_{RM} es el número de renglones añadidos para la minimización del momento. Por lo tanto, M depende de las restricciones de estabilización que se colocan en el problema inverso. Las variables necesarias para identificar las dimensiones apropiadas son:

$$M_{NP} = nrec \cdot sps \cdot rlen$$

$$M_{RS} = Nm \cdot Nt \cdot [Nss \cdot (Nsd-1) + Nsd \cdot (Nss-1)]$$

$$M_{RM} = Nm \cdot Ns \cdot Nt = N$$

donde:

$nrec =$ número de registros de datos

$sps =$ muestras por segundo en los registros de datos

$rlen =$ longitud de los registros en segundos

$Nm =$ número de mecanismos

$Ns =$ número de subfallas

$Nt =$ número de ventanas de tiempo

$Nss =$ número de subfallas a lo largo del strike de la falla

$Nsd =$ número de subfallas a lo largo del dip.

7. Ajustes de la Forma de Onda y Modelo de Deslizamiento

7.1 Programa VANGODSH

El programa VANGODSH se puede utilizar para ver los ajustes entre las formas de onda observadas y sintéticas. Utiliza llamadas de graficación basadas en CALCOMP y por lo tanto requiere configurar una biblioteca de gráficos apropiada o modificar el código para usar las herramientas de graficado disponibles para el usuario. Éste lee los archivos *juliea.dat*, *julieb.dat* y *lisaout.dat*, así como información acerca del modelo de falla, por ejemplo el número de subfallas y el número de ventanas de tiempo, que se proporcionan en una entrada interactiva.

La versión actual del programa produce una serie de archivos postscript que se pueden ver para examinar la calidad de los ajustes. La relación entre las amplitudes sintéticas y observadas (SOA, por sus siglas en inglés) se imprime a la derecha de cada par de registros. Si estas relaciones SOA no promedian alrededor de 1.0 para todas las estaciones, entonces el momento sísmico resultante y los deslizamientos en las subfallas están sobre o subestimados. Para identificar el momento y el deslizamiento adecuados se calcula un factor de escala de amplitud (ASF, por sus siglas en inglés) que ajusta numéricamente las amplitudes predichas en VANGODSH tomando el promedio de los inversos de las relaciones SOA originales. Las relaciones originales deben multiplicarse por este factor ASF para calcular las nuevas proporciones SOA que se distribuyen igualmente por encima y por debajo de 1.0. Este factor ASF se debe incorporar en el escalamiento utilizado por PLISA (abajo) para calcular el momento sísmico adecuado.

7.2 Programa PLISA

Los pesos del deslizamiento en cada subfalla en el archivo *lisaout.dat*, generados por LISA, se listan en el siguiente orden: pesos de deslizamiento para las subfallas de 1 a N para la ventana de tiempo 1, seguidos por pesos de deslizamiento para las subfallas de 1 a N para la ventana de tiempo 2, y así sucesivamente hasta que todas las ventanas de tiempo se envíen al archivo *lisaout.dat*. Estos pesos se convierten a deslizamiento real mediante el uso del programa PLISA, el cual también calcula el momento sísmico correspondiente (en dinas-cm). Para calcular el momento, PLISA requiere las rigideces de cizallamiento (en unidades de 10^{11} gm/cm-sec²) para las subfallas en la dirección del dip. Estas rigideces se pueden inferir de la estructura cortical de entrada, tomando el producto de la densidad de la capa y el cuadrado de la velocidad de la onda S. Para calcular el deslizamiento de las fallas PLISA requiere de un factor de escala

para la dislocación (DSF, por sus siglas en inglés), correspondiente a la dislocación (en centímetros) por unidad de peso para el momento de entrada inicial utilizado para generar los sintéticos de las subfallas. Este factor de escala DSF generalmente corresponde al producto del factor CSF calculado por CADLAC (Sección 5), y el factor ASF obtenido de examinar los ajustes de las formas de onda (ver sección 7.1). El deslizamiento total en centímetros de cada subfalla y el momento sísmico escalar total se imprimen en la pantalla.

PLISA igualmente genera archivos de la forma *contr**.dat*, donde ** es un número de dos dígitos, el cual va desde el 01 al número total de ventanas de tiempo utilizadas en la inversión. Por ejemplo, para tres ventanas de tiempo tendríamos los archivos *contr01.dat*, *contr02.dat* y *contr03.dat*. Éstos contienen los valores de deslizamiento para cada subfalla, con dos opciones posibles, la primera corresponde a los valores acumulados de deslizamiento sumados para ventanas de tiempo consecutivas; la segunda al deslizamiento de cada ventana de tiempo para todas las subfallas. La primera opción es más común y se utiliza de tal manera que el archivo de ventanas temporales final (v. gr., *contr03.dat* para tres ventanas de tiempo) contiene el deslizamiento total a través de la falla obtenida en la inversión. En la versión de PLISA incluida en esta guía, el código genera archivos ASCII que contienen tres columnas x, y, z, donde x e y indican la posición de la subfalla a lo largo y ancho de la falla y z corresponde a los códigos numéricos de la paleta de colores GMT (Wessel y Smith, 1998). Estos códigos se utilizan para trazar cuadros en escala de grises en una malla de fallas, cuyo grado de sombreado depende de la cantidad de deslizamiento. De igual forma se proporciona una opción al ejecutar PLISA para generar los valores de salida como un porcentaje del deslizamiento máximo (en el archivo *contr**.dat*) o relativo a un valor de entrada definido por el usuario.

7.3 Shell script PLTSLIP

Los valores dados en cualquiera de los archivos *contr**.dat* pueden ser graficados usando el shell script de UNIX *pltslip.csh*, el cual usa comandos GMT para generar una gráfica en escala de grises del deslizamiento en una falla rectangular. El shell script utiliza parámetros específicos de la falla utilizados en la inversión para configurar el graficado y entonces puede ser modificado cada vez para acomodar diferentes dimensiones de falla y espaciamientos de las subfallas. El shell script requiere una línea de comandos cuyos argumentos especifiquen cual archivo de *contr**.dat* será graficado. Así, el comando

```
csh pltslip.csh contr01.dat
```

genera una gráfica en escala de grises, en formato postscript, denominado *grdplt.ps*, que muestra los valores de deslizamiento de las subfallas contenidos en el archivo *contr01.dat*. Si se utiliza este shell script, se recomienda al usuario asegurarse de que cualquier cambio a los comandos se realice correctamente.

8. Caso de Prueba

Se incluye un caso de inversión de falla finita que documenta la inversión de ondas P teleseísmicas registradas en 38 estaciones para el terremoto del 9 de octubre de 1995, en Colima-Jalisco, México. Los registros de datos se han preparado previamente en el formato binario de TELMOD y se encuentran en el archivo *telPtp38.dat*. Igualmente se incluye un segundo archivo de datos denominado *telPtp38asc.dat*, el cual contiene estos mismos datos pero en formato ASCII. Este es útil cuando el archivo binario *telPtp38.dat* no es legible o es incompatible con el sistema de cómputo del usuario. En este caso, es necesario ejecutar el programa JULIEW_ ASCII, en lugar de JULIEW, para leer y procesar el archivo de datos.

Este caso de prueba utiliza una falla rectangular de 200 km por 100 km, dividida en 200 subfallas de 10 km por 10 km cada una. El hipocentro se encuentra a una profundidad de 15 km y está situado a 50 km del borde izquierdo, y a 50 km de la parte superior de la falla. El strike de la falla y el dip son de 300° y 15°, respectivamente. La inversión se lleva a cabo para un rake fijo de 90°, y se utiliza una ventana única de tiempo asumiendo una velocidad de ruptura de 3 km/s. Se incluyen dos pruebas de inversión: una usa el código LISA sin restricciones lineales; la segunda usa el código LISASS que aplica un valor de suavizado generado automáticamente, ello para un suavizado espacial y minimización del momento.

9. Comentarios Finales

Esta Guía de Usuario representa el primer esfuerzo por distribuir los programas de modelado de falla finita para la inversión de ondas de volumen para telesismos, entre la comunidad de habla hispana. Como ya se mencionó, los programas de inversión y la versión original de esta guía en inglés se pueden obtener en el sitio GITHUB del USGS (<https://github.com/usgs/finite-fault>). La versión en español de esta guía y los programas también se pueden encontrar en la página del Bol-e (<http://www.geociencias.unam.mx/~bole/bole/page2/page33/page33.html>), del Centro de Geociencias de la UNAM. En un futuro elaboraremos un tutorial con el análisis de diferentes sismos, con descripciones más detalladas, para que el usuario pueda practicar y reproducir los resultados. Por lo pronto, deseamos que este material sea de utilidad y facilite su uso entre estudiantes interesados en el modelado cinemático de la forma de onda.

Agradecimientos

Se agradece la revisión crítica de Jonás D. De Basabe, cuyos comentarios enriquecieron este trabajo. También agradecemos a Jesús Silva Corona el diseño de la figura 1.

Referencias

- Dreger, D. S. (2003). 85.11 TDMT_INV: Time Domain Seismic Moment Tensor INVersion, In: Lee, W. H. K., Kanamori, H., Jennings, P. C., and Kisslinger, C. (Eds.). International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, Academic Press, Amsterdam, Part B, pp. 1627.
- Goldstein, P., D. Dodge, M. Firpo, and L. Minner (2003). SAC2000: Signal processing and analysis tools for seismologists and engineers, Invited contribution to The IASPEI International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, W.H.K. Lee, H. Kanamori, P.C. Jennings, and C. Kisslinger (Editors), Academic Press, London.
- Gómez, J.M., B. Bukchin, R. Madariaga, E.A. Rogozhin, and B. Bogachkin (1997). Rupture process of the 19 August 1992 Susamyr, Kyrgyzstan, earthquake. *Journal of Seismology*, 1, 219-235.
- Gómez-González, J.M., C. Mendoza, A. Sladen, and M. Guzmán-Speziale (2010). Kinematic Source Analysis of the 2003 Tecomán, México, earthquake (Mw 7.6) using Teleseismic Body Waves. *Bol. Soc. Geol.*, 62, 249-262.
- Hansen, P. C. (1998). Rank-Deficient And Discrete Ill-Posed Problems, Numerical Aspects of Linear Inversion, SIAM Monographs on Mathematical Modeling and Computation, Philadelphia, Pennsylvania, pp. 247.
- Hartzell, S. H. and T. H. Heaton (1983). Inversion of strong ground motion and teleseismic waveform data for the fault rupture history of the 1979 Imperial Valley, California, earthquake. *Bull. Seism. Soc. Am.* 73, 1553-1583.
- Hartzell, S. H. and T. H. Heaton (1986). Rupture history of the 1984 Morgan Hill, California, earthquake from the inversion of strong motion records. *Bull. Seism. Soc. Am.* 76, 649-674.
- Hartzell, S. H. (1989). Comparison of Seismic Waveform Inversion Results for the Rupture History of a Finite Fault' Application to the 1986 North Palm Springs, California, Earthquake. *J. Geophys. Res.*, 94, 7515-7534.
- Hsieh, M-Ch., L. Zhao and Ma, K-F (2014). Efficient waveform inversion for average earthquake rupture in three-dimensional structures. *Geophys. J. Int.* 198, 1279–1292.
- Langston, C. A. and D. V. Helmberger (1975). A procedure for modeling shallow dislocation sources. *Geophys. J. R. Astr. Soc.* 42, 117-130.
- Lay, T. and T. C. Wallace (1995). *Modern Global Seismology* (International Geophysics Series). Academic Press, 521.
- Lawson, C. L. and R. J. Hanson (1995). *Solving Least Squares Problems*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, pp. 337.
- Mendoza C. (1993). Coseismic slip of two large Mexican earthquakes from teleseismic body waveforms: Implications for asperity interaction in the Michoacán plate boundary segment. *J. Geophys. Res.* 98, 8197- 8210.

- Mendoza, C. (1994). Modelado cinemático de fuentes sísmicas en una falla finita: aplicaciones. *Física de la Tierra* 6, 141-156.
- Mendoza, C., S. Castro Torres, and J.M. Gómez-González (2011). Moment-Constrained Finite-Fault Analysis using Teleseismic P waves: Mexico Subduction Zone. *Bull. Seism. Soc. Am.* 101, 2675-2684.
- Mendoza, C., and S. H. Hartzell (1989). Slip distribution of the 19 September 1985 Michoacan, Mexico, earthquake: near-source and teleseismic constraints. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 79, 655-669.
- Mendoza, C. and S. Hartzell (1999). Fault-Slip Distribution of the 1995 Colima-Jalisco, Mexico, Earthquake. *Bull. Seism. Soc. Am.* 89, 1338-1344.
- Mendoza, C. and S. Hartzell (2008). Finite-Fault Analysis of the 2004 Parkfield, California, Earthquake Using Pnl Waveforms. *Bull. Seism. Soc. Am.* 73, 1553-1583.
- Mendoza, C. and S. Hartzell (2013). Finite-fault source inversion using teleseismic P waves: Simple parameterization and rapid análisis. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 103, 834–844.
- Nábélek, J., 1984, Determination of earthquake source parameters from inversion of body waves: Cambridge, Massachusetts, USA, Massachusetts Institute of Technology, , Ph.D. Thesis, 361 p.
- Stein, S. and M. Wysession (2003). *An Introduction to Seismology, Earthquakes and Earth Structure*. Wiley-Blackwell.
- Utkucu, M., Pinar, A., and Alptekin, Ö. (2002). A detailed slip model for the 1995, October 1, Dinar, Turkey, earthquake (MS= 6.1) determined from inversion of teleseismic P and SH waveforms. *J. Geophys. Res.*, 151, 184-195.
- Wessel. P. and W.H.F. Smith (1998). New, improved version of the Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. Am. Geophys. Union* 79, 579.
- Zahradnik, J., F. Galovic, E. Sokos, A. Serpetsidaki, and A. Tselentis (2008). Quick Fault-plane Identification by a Geometrical Method: Application to the Mw6.2 Leonidio Earthquake, 6 January 2008, Greece. *Seism. Res. Lett.* 79, 653-662.

Lista de acrónimos

ERI – Earthquake Research Institut (Japón)
NEIC – National Earthquake Information Center (USGS, USA)
NNLS - Non-Negative Least Squares
SAC - Seismic Analysis Code
SSN – Servicio Sismológico Nacional (México)
USGS – United States Geological Survey (USA)

Sitios Web

IRIS: <http://www.iris.washington.edu>
NEIC: <http://earthquake.usgs.gov/contactus/golden/neic.php>

Recibido: 31 de enero de 2017

Recibido corregido por el autor: 18 de mayo de 2017

Aceptación: 7 de junio de 2017