



Pregrado de Geología

Departamento de Física y Geociencias

Proyecto de Grado:

*Tensores de Momento Sísmico de No Doble-Cupla con el Método de Deconvolución Iterativa
para el Nido de Bucaramanga*

Autor:

Daniel Atencio De Martino

Tutor:

Dr. rer. nat. Erick Tuirán Otero

Barranquilla, Colombia

Noviembre, 2022

Agradecimientos

Gracias infinitas y total reconocimiento a mis padres, Cesar y Jessica, sin su apoyo y esfuerzo constante nada de esto sería posible. Me forjaron en valores y principios para convertirme en la persona que soy en día, y con su compañía y amor me motivaron en cada una las etapas de este trabajo y en lograr mi formación profesional. A mi hermano Gabriel, por siempre estar conmigo y compartir momentos de felicidad.

Agradecimiento a mi director de tesis, Dr. Erick Tuiran, por brindarme su constante apoyo, asesorías y conocimiento durante todo este proceso para la culminación de este proyecto. Su ayuda ha sido invaluable para mejorar constantemente en mi formación académica.

A mis tíos, Víctor y Mónica, que me brindaron los mejores recursos y la mejor atención durante mi etapa universitaria. A mis demás familiares que siempre se preocuparon y estuvieron pendientes por mi proceso académico.

A mis compañeros y amigos universitarios, con los que compartí los mejores recuerdos. A mis profesores en toda la etapa universitaria, que impartieron todo su conocimiento y dedicación.

Finalmente, agradecimiento a mis primos, Pedro y Camilo, que me entregaron completa disposición y ayuda para resolver los problemas computacionales surgidos en la implementación del software trabajado.

Resumen

En este trabajo presentamos la caracterización de los tensores de momento sísmico para dos eventos de prueba del Nido de Bucaramanga, correspondientes a los sismos del 11 y 28 de febrero de 2016. Estos sismos tienen la característica especial de tener un porcentaje de CLVD mayor al 30% para soluciones con constricción deviatórica. Para el cálculo de estos tensores hemos implementado el software ISOLA de deconvolución iterativa y hemos comparado nuestras soluciones con las previamente reportadas por el Servicio Geológico Colombiano, obteniendo porcentajes de error cercanos al 30% para la componente CLVD. Los mecanismos focales obtenidos son muy semejantes indicando un comportamiento mayoritariamente de falla inversa para los dos eventos. Hemos obtenido adicionalmente soluciones preliminares sin constricción deviatórica para verificar la estabilidad de las soluciones previamente calculadas encontrando una notoria variación. Se concluye en consecuencia de estos últimos resultados la necesidad de un estudio a futuro que incluya las componentes isotrópicas de los tensores.

Palabras clave: Nido de Bucaramanga, tensores de momento sísmico, componente CLVD, deconvolución iterativa, ISOLA.

Abstract

In this study, we present the characterization of the seismic moment tensors for two test events of the Bucaramanga nest, corresponding to the earthquakes of February 11 and 28, 2016. These earthquakes have the special feature of having a percentage of CLVD greater than 30% for solutions with deviatoric constriction. For the calculation of these tensors, we have implemented the ISOLA software of the iterative deconvolution and we have compared our solutions with those previously reported by the Colombian geological service, achieving error rates close to 30% for the CLVD component. The focal mechanisms obtained are very similar, indicating a mostly reverse fault behavior for the two events. In addition, we have obtained preliminary solutions without deviatoric constriction in order to verify the stability of the solutions previously calculated and we found a notorious difference. We conclude as a consequence of these results the necessity of a future study including the isotropic components of these tensors.

Key words: Bucaramanga nest, seismic moment tensors, CLVD component, iterative deconvolution, ISOLA.

Índice

1. Introducción.....	7
2. Planteamiento del Problema	9
3. Objetivos.....	10
3.1. Objetivo general	10
3.2. Objetivos específicos.....	10
4. Metodología.....	10
4.1 Preparación de los datos	10
4.2 Elaboración de los archivos de polos y ceros.....	11
4.3 Elaboración de archivo de texto con la localización de las estaciones	11
4.4 Revisión de parámetros de entrada del sismo	11
4.5 Selección del modelo de velocidades.....	11
4.6 Selección de las estaciones.....	11
4.7 Definición de la fuente sísmica	12
4.8 Cálculo de las Funciones de Green	12
4.9 Inversión de formas de onda	12
5. Caracterización de eventos sísmicos seleccionados	14
5.1 Información de eventos sísmicos.....	14
5.2 Evento 1: Sismo del 11 de febrero de 2016.....	14
5.3 Evento 2: Sismo del 28 de febrero de 2016.....	15
5.4 Definición del modelo unidimensional de velocidades	16
5.5 Estaciones utilizadas para los eventos sísmicos	17
6. Resultados.....	19
6.1 Solución completa de tensor de momento para el evento 1	19
6.2 Solución deviatórica de tensor de momento para el evento 1	20
6.3 Solución completa de tensor de momento para el evento 2	22
6.4 Solución deviatórica de tensor de momento para el evento 2.....	23
7. Análisis de resultados	25
8. Conclusiones.....	28
9. Referencias	29
Anexos.....	33

Índice de tablas

Tabla 1. Componentes del tensor de momento sísmico para la solución completa del evento 1	20
Tabla 2. Componentes del tensor de momento sísmico para la solución deviatorica del evento 1.....	21
Tabla 3. Componentes del tensor de momento sísmico para la solución completa del evento 2	22
Tabla 4. Componentes del tensor de momento sísmico para la solución deviatorica del evento 2.....	24
Tabla 5. Resultados comparativos de la solución deviatorica de tensor de momento para el evento 1.....	25
Tabla 6. Resultados de la solución completa de tensor de momento para el evento 1.....	26
Tabla 7. Resultados comparativos de la solución deviatorica de tensor de momento para el evento 2.....	27
Tabla 8. Resultados de la solución completa de tensor de momento para el evento 2.....	27

Índice de figuras

Figura 1. Esquema tectónico del Nido de Bucaramanga.....	8
Figura 2. Flujograma del código de computación ISOLA.....	13
Figura 3. Localización del epicentro del sismo del 11 de febrero de 2016 en Los Santos, Santander.....	15
Figura 4. Localización del epicentro del sismo del 28 de febrero de 2016 en Los Santos, Santander.	16
Figura 5. Modelo de velocidades unidimensional propuesto por Vargas (2004) computado en el software ISOLA.....	17
Figura 6. Estaciones utilizadas para el evento 1 computado en el software ISOLA.....	18

Figura 7. Estaciones utilizadas para el evento 2 computado en el software ISOLA.....	19
Figura 8. Resultados de la solución completa de tensor de momento sísmico para el evento 1 computada con ISOLA.....	20
Figura 9. Resultados de la solución deviatórica de tensor de momento sísmico para el evento 1 computada con ISOLA.....	21
Figura 10. Resultados de la solución completa de tensor de momento sísmico para el evento 2 computada con ISOLA.....	23
Figura 11. Resultados de la solución deviatórica de tensor de momento sísmico para el evento 2 computada con ISOLA.....	24

Índice de anexos

Anexo 1. Solución de Tensor de Momento Sísmico con constricción deviatórica para el evento 1 por el Método ISOLA, según el Catálogo de Mecanismos Focales y Tensores de Momento Sísmico del Servicio Geológico Colombiano.....	33
Anexo 2. Solución de Tensor de Momento Sísmico para el segundo sismo por el Método ISOLA, según el Catálogo de Mecanismos Focales y Tensores de Momento Sísmico del Servicio Geológico Colombiano.....	34

1. Introducción

El Nido de Bucaramanga constituye una intensa fuente de actividad sísmica ubicada en la región noreste de Colombia en $6,8^{\circ}\text{N} - 73,1^{\circ}\text{W}$ a profundidades intermedias de 155 km, entre la Cordillera Central y los Llanos Orientales (Frohlich et al., 1995; Ojeda y Havskov, 2001; Zarifi y Havskov, 2003). Presenta sismos cuyos hipocentros están localizados a distancias intermedias (>60 km) por debajo de la superficie, por lo que está definido como nido sísmico de profundidad intermedia (López, 2011). El Nido de Bucaramanga destaca por su alta tasa de actividad en un volumen mucho menor a diferencia de otros nidos de profundidades intermedias (nido de Vrancea e Hindu Kush), siendo unas de las pocas zonas en donde se pueda apreciar su alta actividad a pesar de ser muy compacto (Schneider et al., 1987; Zarifi y Havskov, 2003). Con registros de aproximadamente 15 sismos por día a profundidades de 140 km, se consolida como una de las concentraciones de sismos de profundidad intermedia con mayor actividad en el mundo (López, 2011). De acuerdo con la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC), en el Nido de Bucaramanga “se han localizado alrededor de 62.400 sismos con profundidades mayores a 70 km y magnitudes superiores a 2, entre el 1 de junio de 1993 y el 22 de julio de 2020” y actualmente representa cerca del 75% del catálogo global de la red sismológica nacional (Servicio Geológico Colombiano, 2020).

El origen de la sismicidad del nido se encuentra fuertemente asociado a la configuración tectónica de la zona, debido a que se encuentra ubicado cerca de la intersección altamente compleja y tectónicamente activa de las placas Nazca, Caribe y Sudamericana (Schneider et al., 1987). Varios modelos tomográficos (Cortés y Angelier, 2005; Pennington, 1983; Taboada et al., 2000) sugieren que una porción de la Placa Caribe se está subduciendo hacia el sureste, y el nido de Bucaramanga se encuentra dentro de ella. En estos modelos, la Placa Nazca subduce también hacia el este, pero al sur del nido de Bucaramanga. Otro modelo propuesto por Van der Hilst y Mann (1994) sugiere que el nido de Bucaramanga está ubicado en la placa de Nazca en un segmento que los autores denominan *Bucaramanga slab*. Un tercer modelo sugerido por Zafiri et al. (2007) propone, basado en las ubicaciones y los mecanismos focales de los terremotos del nido de Bucaramanga, que la colisión en profundidad entre las placas de Nazca y el Caribe es responsable de la sismicidad del nido.

El nido de Bucaramanga muestra mecanismos focales muy variables (Frohlich y Nakamura, 2009; Schneider et al., 1987) y en un número importante de mecanismos focales se observa un gran porcentaje de componentes CLVD (*compensated linear vector dipole*) (Frohlich, 2006; Zarifi et al., 2007). El mecanismo focal en sismología describe el tipo de deslizamiento que ocurre durante un terremoto (rumbo, normal o inverso) y muestra la orientación de la falla que se desliza, es obtenido por formas de ondas sísmicas utilizando las polaridades de las primeras llegadas de las ondas P o recuperando el tensor de momento (Frohlich, 1995; Lay y Wallace, 1995). Comúnmente “se representan con una geometría de *beachball* (bola de playa), resultantes de una doble cupla pura del tensor de momento sísmico, para caracterizar la mecánica de cizalla de eventos sísmicos en la corteza” (Lay y Wallace, 1995).

La caracterización completa de un evento sísmico proporciona información importante, adicional a la de los mecanismos focales, tal como, tiempo de origen, la ubicación del epicentro, la profundidad focal, el momento sísmico y la magnitud. El tensor de momento sísmico \mathbf{M} describe el patrón general de radiación elástica que ocurre en un terremoto (Frohlich, 1994). Es una representación general de una fuente sísmica y de las fuerzas que se generan en un medio elástico durante un sismo (Vallina et al., 2018). Para esta representación es necesario utilizar un tensor en lugar de un vector, esto debido a que el sismo induce movimientos longitudinales (ondas P) y movimientos transversales (ondas S) (Frohlich, 1994).

Dicho tensor no está limitado a ser doble cupla puro, y puede ser descompuesto en tres componentes (Frohlich, 1994; Lay y Wallace, 1995): 1) una componente puramente isotrópica asociada a explosión o implosión, produciendo solo movimientos longitudinales que tienen la misma amplitud en todas las direcciones, 2) una componente de Doble Cupla (DC) asociado a una mecánica de cizalla y 3) una componente de dipolo lineal compensado (CLVD) asociado a procesos de No Doble-Cupla, tales como rupturas internas dentro de la corteza y manto.

Para el cálculo de tensores de momento sísmico se utiliza el método de deconvolución iterativa que invierte formas de onda para obtener mecanismos focales y patrones de ruptura de eventos sísmicos complejos (Kikuchi y Kanamori, 1991). Dicho método describe una fuente sísmica como una secuencia de fuentes puntuales con varios mecanismos focales, donde se determina las fuentes puntuales de forma iterativa haciendo coincidir los registros observados con los sintéticos, y utilizando un tensor de momento para describir cada fuente puntual (Kikuchi y Kanamori, 1991). El software ISOLA desarrollado por Sokos y Zahradník (2008) realiza inversiones de forma de onda para encontrar parámetros de la fuente sísmica siguiendo el método de deconvolución iterativa, y obtiene el tensor de momento a través de una inversión de mínimos cuadrados, que sumado a la inversión de formas de onda permite el cálculo de tensor de momento completo, tensor de momento deviatorico y tensor de doble cupla puro (Sokos y Zahradník, 2013).

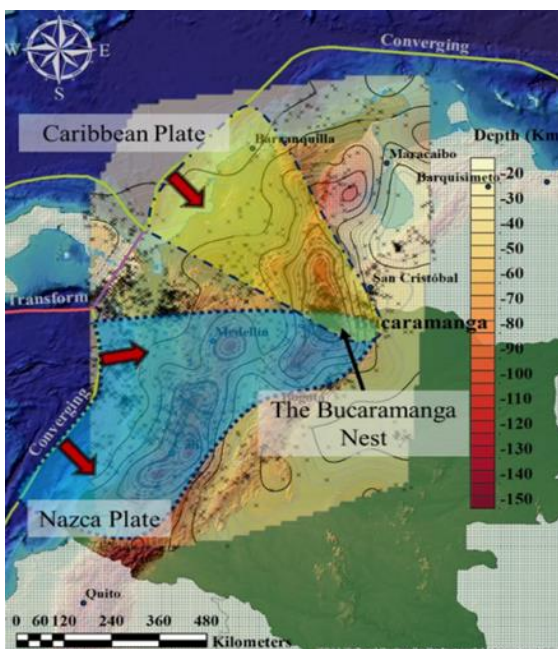


Figura 1. Esquema tectónico del Nido de Bucaramanga. Se observa colisión oblicua entre la Placa Caribe y la Placa Nazca, responsable de la sismicidad activa del nido. Tomado de: Moreno (2018).

2. Planteamiento del Problema

La mayoría de los estudios sismológicos asumen que los terremotos tienen mecanismos de fuente de doble cupla (DC), correspondientes al movimiento de corte en fallas planas (Miller et al., 1998). Sin embargo, muchos terremotos bien registrados tienen patrones de radiación que se apartan radicalmente de este modelo, lo que indica procesos de origen fundamentalmente diferentes y mecanismos mayormente asociados a fuentes de No-Doble Cupla (Julian, 1983; Kanamori et al., 1984; Julian y Sipkin, 1985; Julian et al., 1997). La hipótesis de que los mecanismos de origen de los terremotos pertenecen a fuentes de Doble Cupla se ha vuelto ampliamente aceptada al punto de ser tratada casi como una ley fundamental por muchos sismólogos, donde los argumentos que la sustentan se basan prioritariamente en la limitación de la cantidad, calidad y cobertura de datos sísmicos (Julian et al., 1998).

La suposición de que los terremotos son causados por fallas cortantes, involucra un sistema de fuerzas equivalentes en un medio isotrópico por un doble par de fuerzas sin torque neto o también conocido como doble cupla (Gilbert, 1884; Lawson, 1908; Julian et al., 1998; Miller et al., 1998). No obstante, se encuentran registros de investigaciones donde se han documentado sismos, especialmente ubicados en áreas volcánicas y geotérmicas, que presentan mecanismos fuertemente relacionados a fuentes de No-Doble Cupla (Kubas y Sipkin, 1987; Kanamori et al., 1984; Kanamori et al., 1993). Tal como sostienen Julian et al. (1998) “comprender los terremotos de No Doble-cupla (NDC) es importante tanto para estudiar el proceso de fallas en detalle como para identificar los procesos de fallas que no son de corte que aparentemente ocurren en algunos terremotos”.

Los mecanismos responsables de sismos de No Doble-Cupla (NDC) han sido analizados fundamentalmente por *Frohlich y Willemann (1987)*, *Frohlich (1994)* y *Frohlich (1995)*. En relación con este aspecto, los mecanismos para sismos con componentes de No Doble-Cupla se vinculan usualmente a implosiones o rupturas internas dentro de la corteza y el manto, y a terremotos complejos con dos o más subeventos separados en espacio y tiempo que ocurren en fallas no paralelas orientadas (Frohlich, 1994).

El correcto entendimiento de los mecanismos que originan sismos de No-Doble Cupla, resulta esencial para abordar la problemática de nuestro interés, dado que históricamente la mayoría de sismos del Nido de Bucaramanga han sido asociados con el modelo de Doble-Cupla. Ejemplos de estudios de la sismicidad del nido de Bucaramanga tales como *Hurtado (1995)*, *Hurtado (1999)*, *Yepes (2011)*, *Perico-Martinez y Perico-Granados (2014)* y *Sepúlveda-Jaimes et al., (2018)* se concentran en estudiar las propiedades de la fuente sísmica del nido de Bucaramanga basados en el modelo de Doble-Cupla sin analizar los posibles aportes de componentes de No Doble-Cupla.

Lo anteriormente mencionado conduce a plantear la siguiente pregunta de investigación:

¿Es posible determinar mediante la solución de tensor de momento sísmico obtenida con el método de deconvolución iterativa las diferentes componentes tensoriales (doble cupla, isotrópica, CLVD) para eventos sísmicos del Nido de Bucaramanga?

3. Objetivos

A continuación, presentamos los objetivos de este trabajo.

3.1 Objetivo general

Caracterizar eventos sísmicos mayoritariamente de no-doble cupla del Nido de Bucaramanga, a través del cálculo numérico de tensores de momento sísmico con el software ISOLA de deconvolución iterativa.

3.2 Objetivos específicos

- Implementar el software ISOLA de deconvolución iterativa en la generación de tensores de momento sísmico para eventos del Nido de Bucaramanga.
- Hallar tensores de momento sísmico para eventos ya estudiados por el Servicio Geológico Colombiano, con el objeto de validar los parámetros de entrada utilizados (tales como el modelo de velocidades, factores de calidad, espectros de respuesta, etc.), comparar con las soluciones ya existentes y evaluar la coherencia de los cálculos propios realizados.
- Determinar porcentualmente las componentes de No-Doble-Cupla en las soluciones obtenidas para complementar estudios previos sobre la fuente sísmica del Nido de Bucaramanga.

4. Metodología

Por medio del programa ISOLA (Sokos y Zahradník, 2008), se busca obtener el tensor de momento sísmico para un determinado evento por medio de un proceso de inversión de las formas de onda. Para llegar a la mencionada solución se requiere una serie de pasos que se describen a continuación:

4.1 Preparación de los datos

Para el procesamiento de los datos con el software ISOLA (Sokos y Zahradník, 2008), se deben preparar un conjunto de archivos previos a la posterior ejecución en el programa. En primer lugar, se deben descargar los archivos de formas de onda proporcionados por el Servicio Geológico Colombiano (SGC), una vez descargado los archivos que se encuentran en formato mseed se procede a realizar su conversión en formato SAC debido a que este último formato es solicitado por el software.

4.2 Elaboración de los archivos de polos y ceros

Estos archivos corresponden a la corrección instrumental de las formas de onda previamente descargadas y procesadas en formato SAC. Para crear estos archivos se debe revisar los sismógrafos de respuesta (sensibilidad del digitalizador y sensibilidad del sismómetro) para cada estación seleccionada en sus tres componentes (componente Norte-Sur, componente Este-Oeste y componente vertical Z). Es decir, cada estación debe contar con 3 archivos pole-zero, un archivo por cada componente, por ejemplo, si se seleccionan tres estaciones, en total se deben tener 9 archivos pole-zero.

4.3 Elaboración de archivo de texto con la localización de las estaciones

El código ISOLA solicita la creación de un archivo de texto que contenga la localización de las estaciones seleccionadas, este archivo debe contener 3 columnas, nombre de la estación, latitud y longitud, separadas por espacios, adicionalmente el nombre de la estación debe tener 3 caracteres.

4.4 Revisión de parámetros de entrada del sismo

Los parámetros de entrada del sismo se definen en una ventana proporcionada por ISOLA, a manera de formulario se debe proporcionar la información del evento, esto incluye lo siguiente: latitud, longitud, profundidad del sismo, magnitud, fecha del sismo, tiempo de origen y agencia sísmica. Una vez se ha suministrado toda esta información, el programa crea un archivo denominado **event_info**, que contiene dicha información que será necesaria para los pasos posteriores en el proceso de inversión.

4.5 Selección del modelo de velocidades

Luego de crear el archivo **event_info**, el paso a seguir consiste en definir y seleccionar el modelo de velocidades con el cual se efectuarán los cálculos. La creación del modelo de velocidades resulta fundamental debido a que ISOLA solicita dicho modelo para continuar con el proceso de inversión. Para definir el modelo de velocidades, ISOLA proporciona una ventana a modo de tabla, donde el usuario debe suministrar para cada capa, teniendo un máximo de 15 capas: profundidad de la capa superior, velocidades de onda P (V_p en km/s), velocidades de onda S (V_s en km/s), densidad (en g/cm³), y factores de atenuación Q_p y Q_s . El modelo de velocidades se crea bajo un archivo denominado **crystal.dat**

4.6 Selección de las estaciones

Una vez definido y seleccionado el modelo de velocidades, se procede a escoger las estaciones que presenten formas de onda óptimas para el proceso de inversión. Con el archivo de localización de estaciones previamente creado, se genera un mapa de distribución de las estaciones (teniendo en cuenta latitud y longitud de cada estación), en donde se selecciona cada

una de las estaciones que se quieren incluir en la inversión. Después de elegir las respectivas estaciones, se despliega una ventana de advertencia que muestra el número total de estaciones seleccionadas.

4.7 Definición de la fuente sísmica

Posterior a definir el número de estaciones utilizadas para la inversión, se debe generar la ubicación de la fuente sísmica de prueba (*Trial source positions*), y para ello se selecciona en la ventana principal de ISOLA la opción **Seismic Source Definition**, donde se debe escoger entre una fuente debajo del epicentro (Sources below epicenter) o una fuente en una línea o plano (Sources on a line or plane). Para el caso de una fuente debajo del epicentro, se despliega una ventana que solicita información de profundidad inicial (km), paso o incrementos por profundidad (km) y número de fuentes. Para el caso de una fuente en una línea o plano, se despliega una ventana que solicita información de número de fuentes a lo largo del rumbo, espaciamiento a lo largo del rumbo (km), número de fuentes a lo largo del buzamiento y espaciamiento a lo largo del buzamiento (km).

4.8 Cálculo de las Funciones de Green

Después de finalizar con la definición de la fuente sísmica, se procede a preparar el cómputo de las funciones de Green, que constituye el primer paso para iniciar la inversión. Al presionar la opción **Green Function Computation** en la ventana principal de ISOLA, se muestra un cuadro que solicita ingresar la frecuencia máxima (Hz) de las funciones de Green que se calcularán. Al presionar el botón Run, se ejecuta el cómputo de Green llamando a los ejecutables `gr_xyz.exe` y `elemse.exe`, que permiten la generación de los sismogramas elementales. Una vez aparezca el cuadro de diálogo “Copy files in invert folder”, se debe presionar el botón OK y el proceso continúa hasta que finalmente se despliega una ventana con el mensaje de que los archivos se han copiado correctamente en la carpeta *invert* y se puede continuar con la inversión.

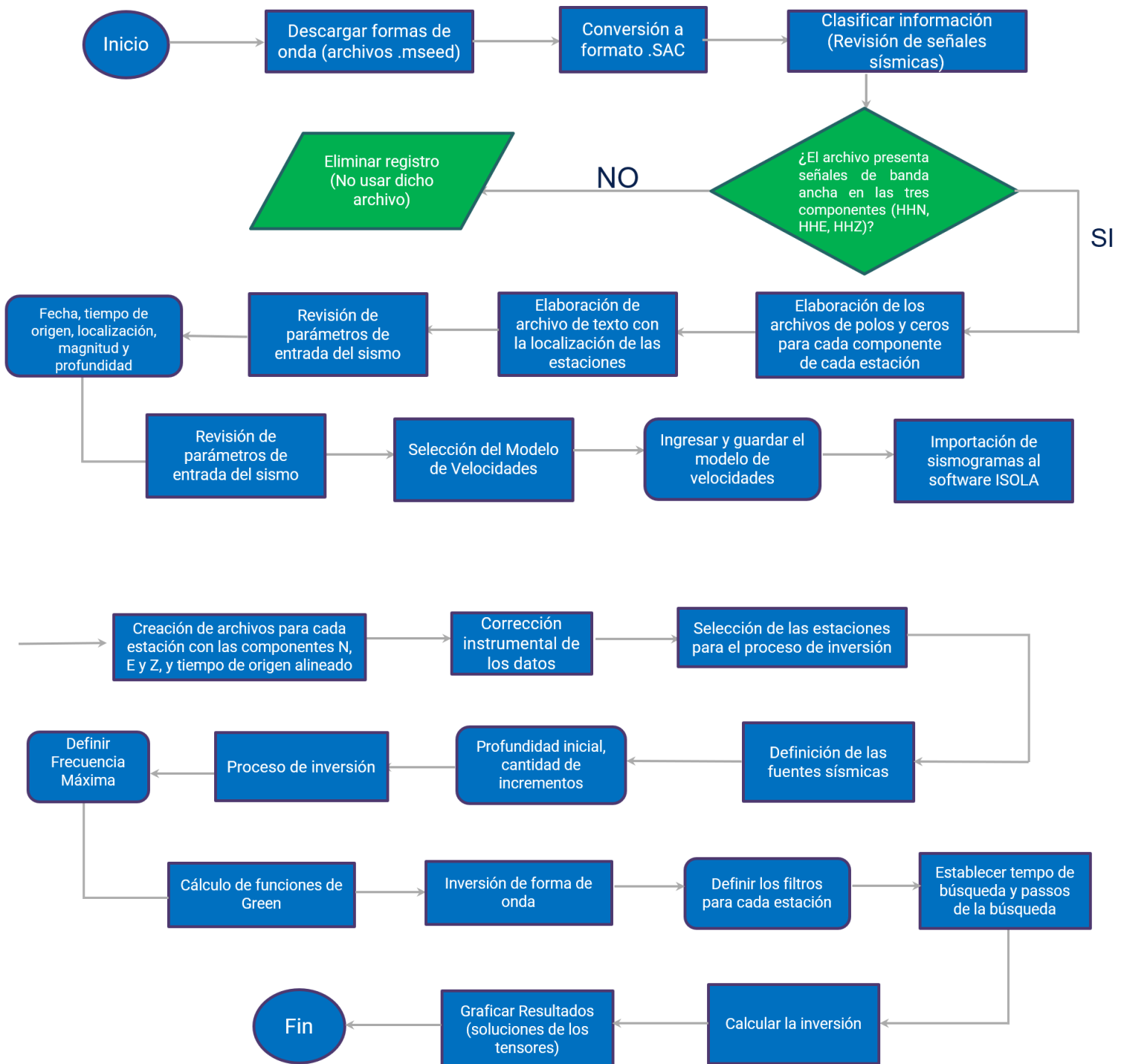
4.9 Inversión de formas de onda

El último paso de la ejecución del código ISOLA, es el proceso de inversión de formas de onda. Al seleccionar en la ventana principal del código la opción **Waveform Inversion**, se despliega un cuadro donde se deben escoger determinadas opciones con respecto al filtro, tipo de inversión, número de subeventos y parámetros de tiempo. Para el filtro, se debe definir un rango de frecuencia (baja-alta frecuencia en Hz). Para el tipo de inversión, se debe seleccionar entre las opciones de tensor de momento completo (Full MT), tensor de momento deviatorico (Deviatoric MT), doble cupla (DC constrained) o mecanismo fijo (Fixed mechanism). Luego, de definir cada una de las condiciones, se debe presionar el botón **Compute Weights**, que calcula automáticamente los pesos que se aplicarán en la inversión. Finalmente, al presionar **Run** el código principal `isola.exe` junto con `invert.m` se ejecutan en la ventana de comandos.

En la figura presentada a continuación, se muestra el flujograma desarrollado por Vásquez (2019), donde se encuentra reflejada la serie de pasos a seguir para dar ejecución al código ISOLA.

Figura 2. Flujograma del código de computación ISOLA. Tomado y modificado de: Vásquez Pachón (2019).

Flujograma de ISOLA



5. Caracterización de eventos sísmicos seleccionados

La búsqueda e identificación de sismos en el Nido Sísmico de Bucaramanga se realiza a través de los datos proporcionados por el Catálogo de Mecanismos Focales y Tensores de Momento Sísmico del Servicio Geológico Colombiano (SGC). El mencionado catálogo proporciona información y presenta “soluciones calculadas por los métodos SWIFT, SCMTV, Fase W, ISOLA y Polaridades, para eventos sísmicos localizados en el territorio nacional y regiones fronterizas” (Servicio Geológico Colombiano, s.f.).

Dentro del catálogo, la búsqueda y posterior selección de sismos debía cumplir con 3 requisitos que fueron establecidos de la siguiente forma:

- 1) Que los sismos escogidos estén localizados en el Nido de Bucaramanga, es decir, que la búsqueda sea realizada en las coordenadas geográficas $6,5^{\circ}$ - 7° N y $7,3^{\circ}$ - $7,4^{\circ}$ W y en un intervalo de profundidad focal de 145-180 km según el rango de profundidades hipocentrales documentadas por Zarifi et al. (2007).
- 2) Que los sismos escogidos hayan ocurrido antes o igual a marzo de 2018. La localización de sismos en la actualidad depende mayoritariamente de los software de análisis SEISAN y Seiscomp. Los sismos presentados hasta marzo de 2018 son analizados por medio del software SEISAN. Posterior a marzo de 2018, el software para la localización de sismos cambió a Seiscomp. Hasta el momento se ha definido que la localización sea realizada por SEISAN por eficiencia y tiempo debido a que SEISAN trabaja en el sistema operativo Windows y en cambio Seiscomp requiere un aprendizaje en el entorno de programación Ubuntu/Linux.
- 3) Que los sismos escogidos dentro del catálogo del SGC presenten soluciones de tensor de momento sísmico obtenidas con el software ISOLA que incorpora el método de deconvolución iterativa.

Dos sismos cumplen con las 3 condiciones de elección:

- 1) Sismo del 11 de febrero de 2016
- 2) Sismo del 28 de febrero de 2016

5.1 Información de eventos sísmicos

5.2 Evento 1: Sismo del 11 de febrero de 2016

De acuerdo con la información del Servicio Geológico Colombiano (SGC), el sismo se presentó el día 11 de febrero del año 2016 a las 07:14:37 (hora UTC) en la región de Los Santos, municipio del departamento de Santander, con profundidad de 152 km y magnitud de $4.7 M_w$. En la Figura 2, se observa la localización del sismo con coordenadas 6.82° N 73.14° W.

El tensor de momento sísmico reportado para este evento en el catálogo de mecanismos focales y tensores del SGC fue de 8.080×10^{15} Nm con magnitud de $4.5 M_w$ (Anexo 1).

2016-02-11 02:14 Hora local
Los Santos - Santander, Colombia
Magnitud 4.7

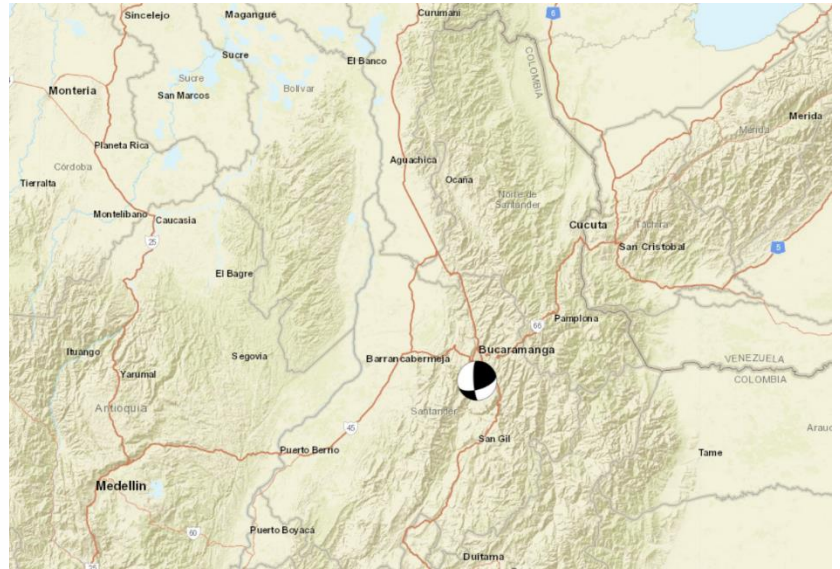
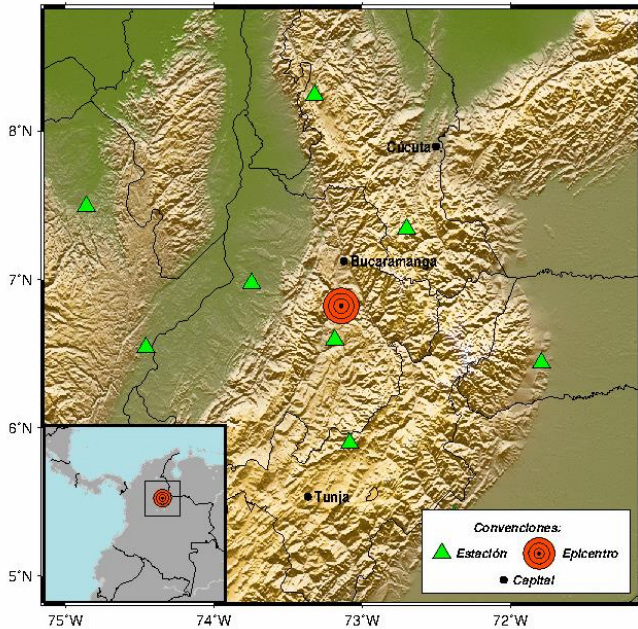


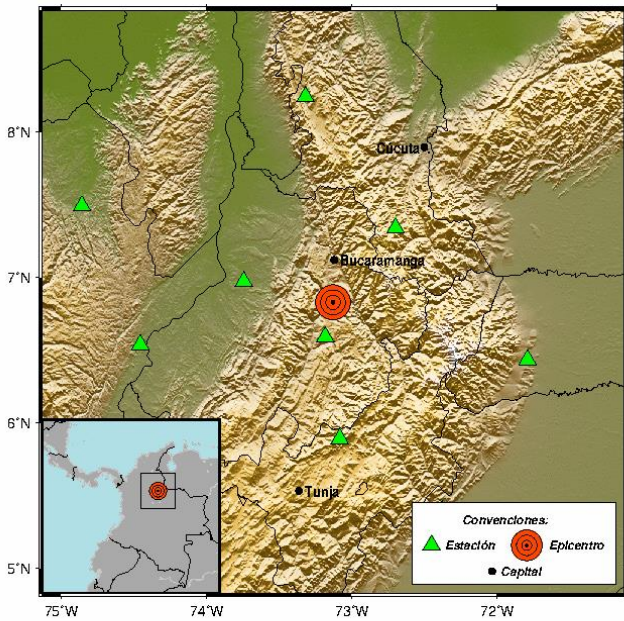
Figura 3. Localización del epicentro del sismo del 11 de febrero de 2016 en Los Santos, Santander. Tomada del Servicio Geológico Colombiano (SGC). Tomado de: <https://www.sgc.gov.co/catalogo-mapa>

5.3 Evento 2: Sismo del 28 de febrero de 2016

Con base a la información del Servicio Geológico Colombiano (SGC), el sismo se presentó el día 28 de febrero del año 2016 a las 05:28:12 (hora UTC) en la región de Los Santos, municipio del departamento de Santander, con profundidad de 150 km y magnitud de $4.5 M_w$. En la Figura 3, se observa la localización del sismo con coordenadas $6.83^\circ N$ $73.13^\circ W$.

El tensor de momento sísmico reportado para este evento en el catálogo de mecanismos focales y tensores del SGC fue de 2.233×10^{15} Nm con magnitud de $4.2 M_w$ (Anexo 2).

2016-02-28 00:28 Hora local
Los Santos - Santander, Colombia
Magnitud 4.5



Localizado a 9 km de Los Santos (Santander)
Latitud 6.83 Longitud -73.13
Profundidad 150

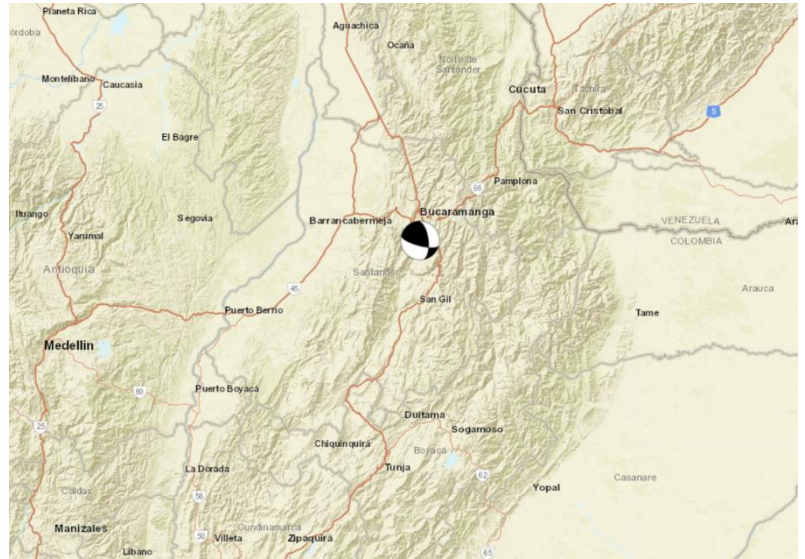


Figura 4. Localización del epicentro del sismo del 28 de febrero de 2016 en Los Santos, Santander. Tomada del Servicio Geológico Colombiano (SGC). <https://www.sgc.gov.co/catalogo-mapa>.

5.4 Definición del modelo unidimensional de velocidades

Para la definición del modelo de velocidades, se implementó el modelo propuesto por Vargas (2004), donde dicho autor proporciona para 6 capas las velocidades de las ondas P y S, los valores de densidad y los factores de atenuación Q_p y Q_s . El modelo de velocidades se encuentra definido con 6 capas (0 - 100 km), con velocidad de las ondas de cuerpo primarias (6.0 - 8.6 Km/s), velocidad de ondas de cuerpo secundarias (3.31- 4.86 Km/s), y densidades (2.910 - 3.436 g/cm³). En la Figura 4, se observa la representación gráfica del modelo de velocidades utilizado.

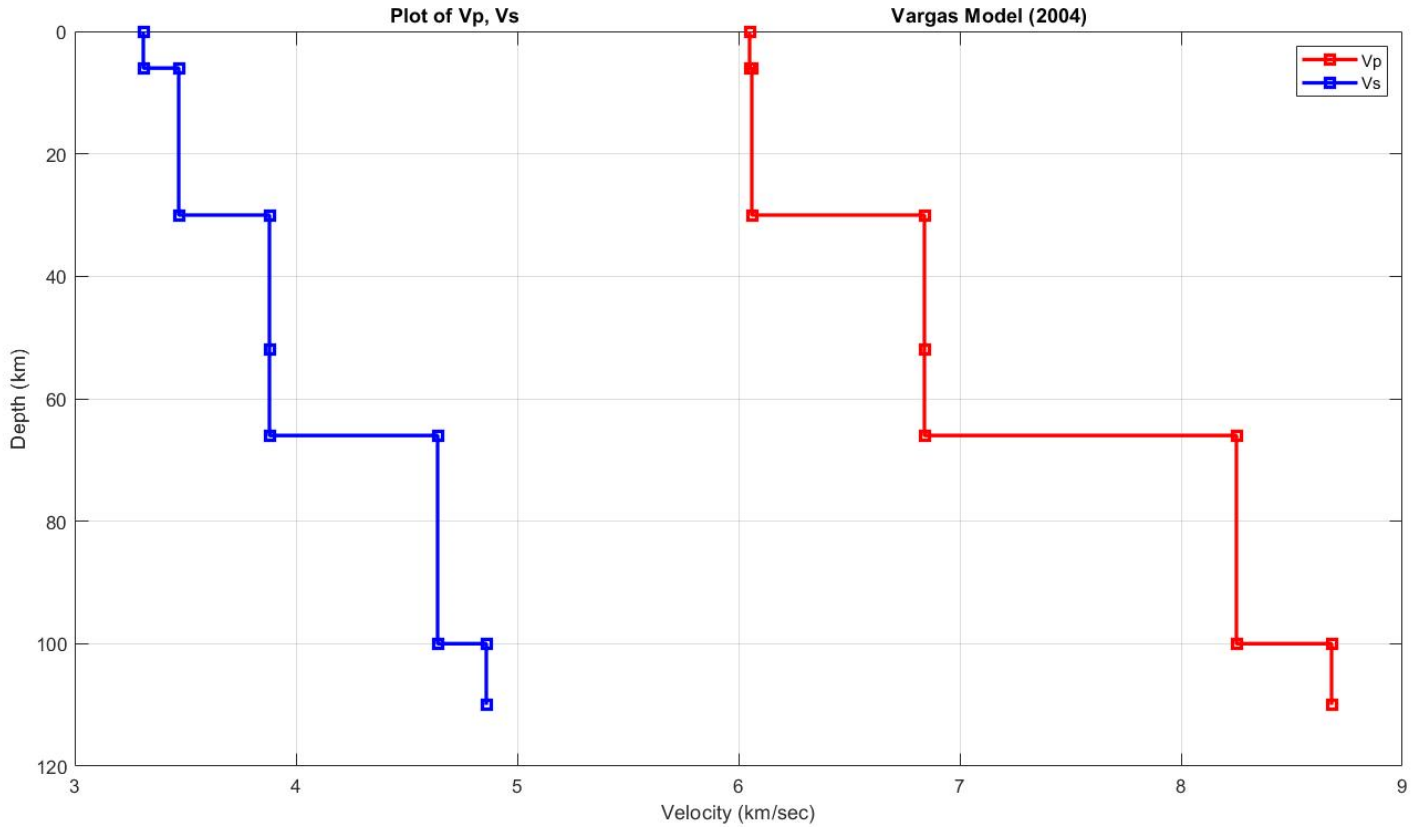


Figura 5. Modelo de velocidades unidimensional propuesto por Vargas (2004) computado en el software ISOLA

5.5 Estaciones utilizadas para los eventos sísmicos

El número de estaciones utilizadas para cada uno de los eventos fue de 4 estaciones. Respectivamente, para el evento 1 se utilizaron las estaciones de Chingaza (CHI), Zaragoza (ZAR), Helena (HEL) y Puerto Berrío (PTB) en sus coordenadas de latitud y longitud tal como se muestra en el mapa de la Figura 5. Para el evento 2 se utilizaron las estaciones de Chingaza (CHI), Zaragoza (ZAR), Puerto Berrío (PTB) y Rusia (RUS), tal como se evidencia en el mapa de la Figura 6.

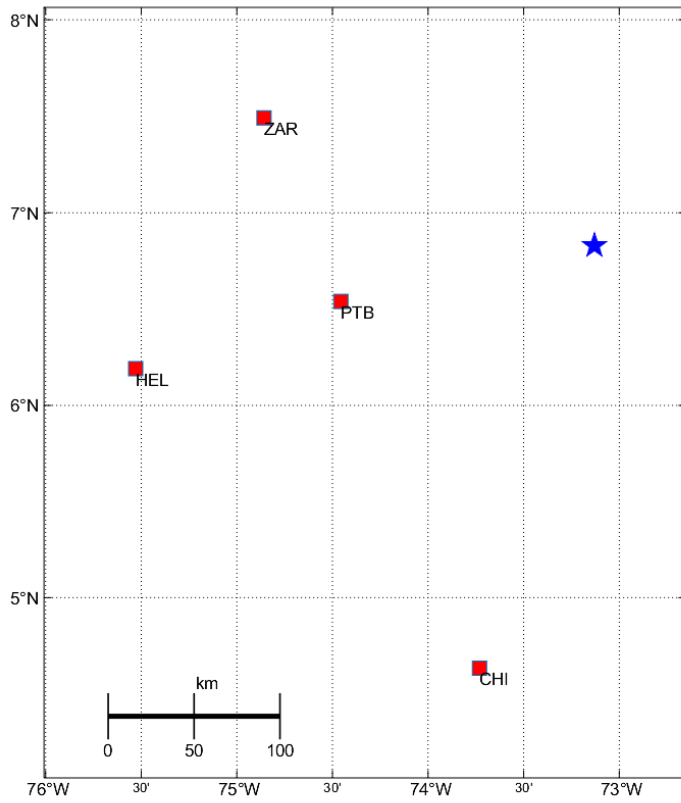


Figura 6. Estaciones utilizadas para el evento 1 computado en el software ISOLA.

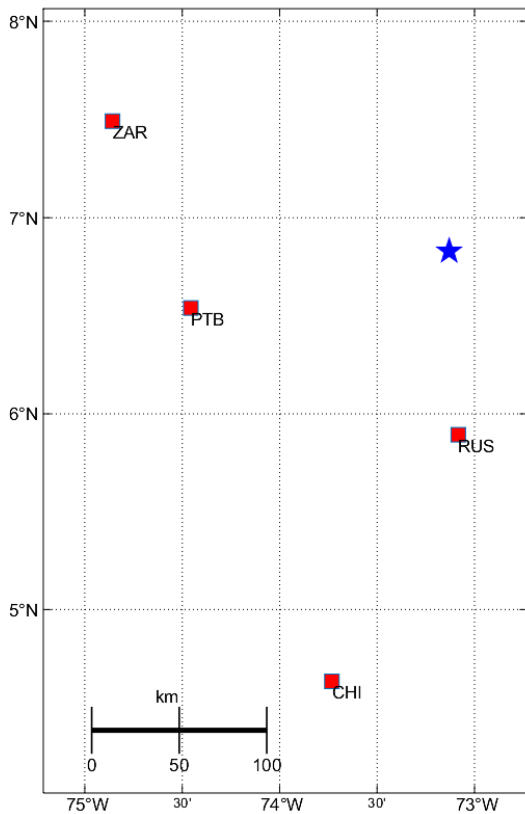


Figura 7. Estaciones utilizadas para el evento 2 computado en el software ISOLA

6. Resultados

6.1 Solución completa de tensor de momento para el evento 1

En la **Figura 8** se observan los resultados obtenidos para la solución completa de tensor de momento después de realizar el proceso de inversión con epicentro fijo, se evidencia: profundidad de 154 km, momento sísmico (M_0) de 2.425×10^{17} Nm y magnitud de $5.6 M_w$. De las 20 fuentes de prueba ejecutadas, la solución del tensor corresponde a la fuente de prueba 20 con un time shift de 2.985 seg y reducción de varianza de 0.13. Para las componentes del tensor se presentan los siguientes valores: 60.7% de VOL (volumétrico), 29.2% de DC (doble cupla) y 10.1 % de CLVD (componente de dipolo lineal compensado). El número de estaciones utilizadas para la solución completa de tensor fue de 4 estaciones y corresponden a PTB, ZAR, CHI y HEL, en las que se empleó un rango de baja - alta frecuencia de 0.04 - 0.09 Hz.

El cálculo del tensor de momento sísmico se evidencia en la **ecuación 1**, y las componentes del tensor se especifican en la Tabla 1. Respecto a los planos nodales obtenidos para esta solución, se presenta para el primer plano un rumbo (strike) de 66° , buzamiento (dip) de 73° e inclinación

(rake) de 165° . Para el segundo plano se tiene un rumbo (strike) de 160° , buzamiento (dip) de 76° e inclinación (rake) de 18° . El mecanismo focal para este evento evidencia una falla de tipo oblicua inversa (Fig. 8).

$$M_w = \begin{pmatrix} 2.018 & 0.282 & -0.189 \\ 0.282 & 2.345 & -0.813 \\ -0.189 & -0.813 & 0.796 \end{pmatrix} \times 10^{17} \text{ N}\cdot\text{m} \quad \text{ecuación 1.}$$

M_{xx}	M_{yy}	M_{zz}	M_{xy}	M_{yz}	M_{zx}
2.018	2.345	0.796	0.282	-0.813	-0.189
$\times 10^{17}$	$\times 10^{17}$	$\times 10^{17}$	$\times 10^{17}$	$\times 10^{17}$	$\times 10^{17}$

Tabla 1. Componentes del tensor de momento sísmico para la solución completa del evento 1

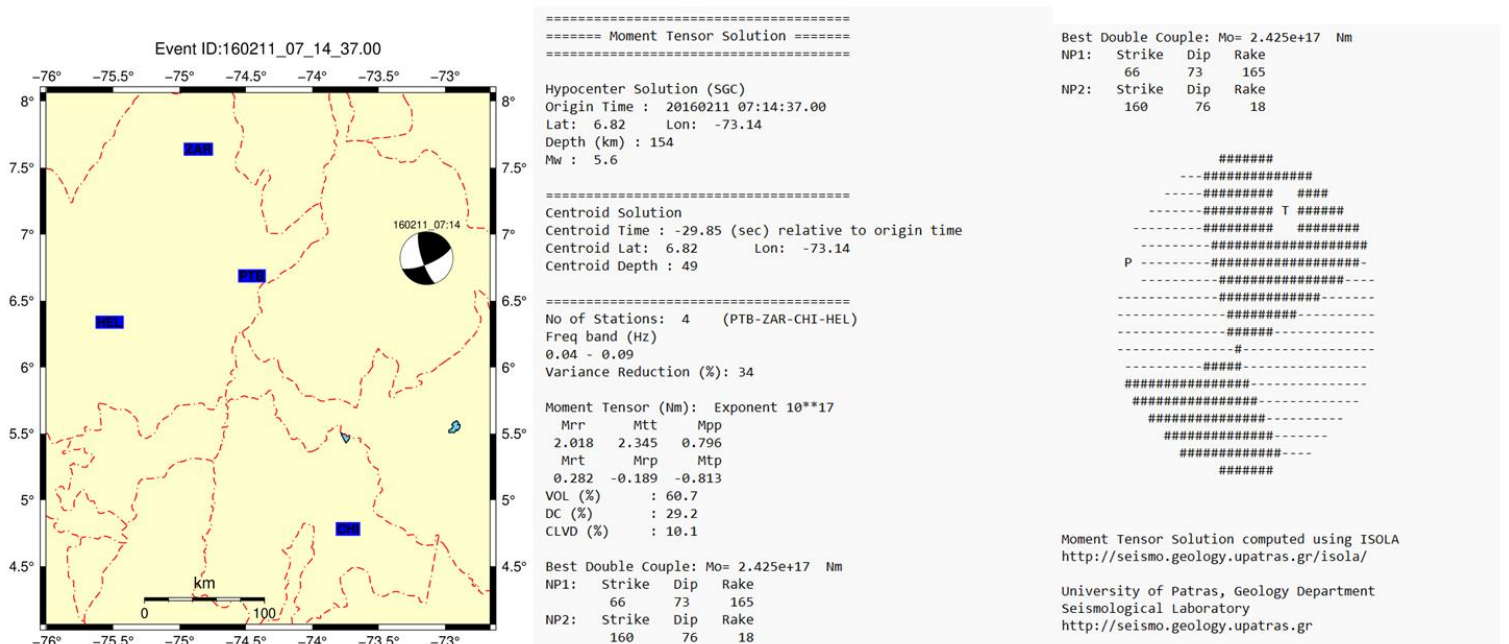


Figura 8. Resultados de la solución completa de tensor de momento sísmico para el evento 1 computada con ISOLA.

6.2 Solución deviatorica de tensor de momento para el evento 1

Para la solución deviatorica de tensor de momento sísmico presente en la **Figura 9**, se destaca profundidad de 154 km, magnitud de $5.3 M_w$ y momento sísmico (M_0) de 1.173×10^{17} Nm. Con reducción de varianza de 0.45 y un time shift de 2.98 seg, las componentes del tensor se clasifican en un 0% de VOL (volumétrico), 68.6% de DC (doble cupla) y 31.4% de CLVD

(componente de dipolo lineal compensado). El rango de baja-alta frecuencia empleado, al igual que en la solución completa de tensor, corresponde a 0.04-0.09 Hz.

En la **ecuación 2**, se evidencia igualmente el cálculo del tensor para esta solución y la descripción de cada uno de sus componentes en la Tabla 2. Respecto a los planos nodales arrojados en la solución se obtiene para el primer plano nodal un rumbo de 67°, buzamiento de 72° e inclinación de 165°. Para el segundo plano nodal se presenta respectivamente un rumbo de 162°, buzamiento de 76° e inclinación de 19°. El mecanismo focal para esta solución, tal como lo describe la Figura 9, corresponde a una falla oblicua inversa.

$$M_W = \begin{pmatrix} 3.294 & 2.541 & -2.014 \\ 2.541 & 5.544 & -8.199 \\ -2.014 & -8.199 & -8.839 \end{pmatrix} \times 10^{16} \text{N*m} \quad \text{ecuación 2.}$$

M_{xx}	M_{yy}	M_{zz}	M_{xy}	M_{yz}	M_{zx}
3.294 $\times 10^{16}$	5.544 $\times 10^{16}$	0.796 $\times 10^{16}$	0.282 $\times 10^{16}$	-8.199 $\times 10^{16}$	-2.014 $\times 10^{16}$

Tabla 2. Componentes del tensor de momento sísmico para la solución deviatorica del evento 1

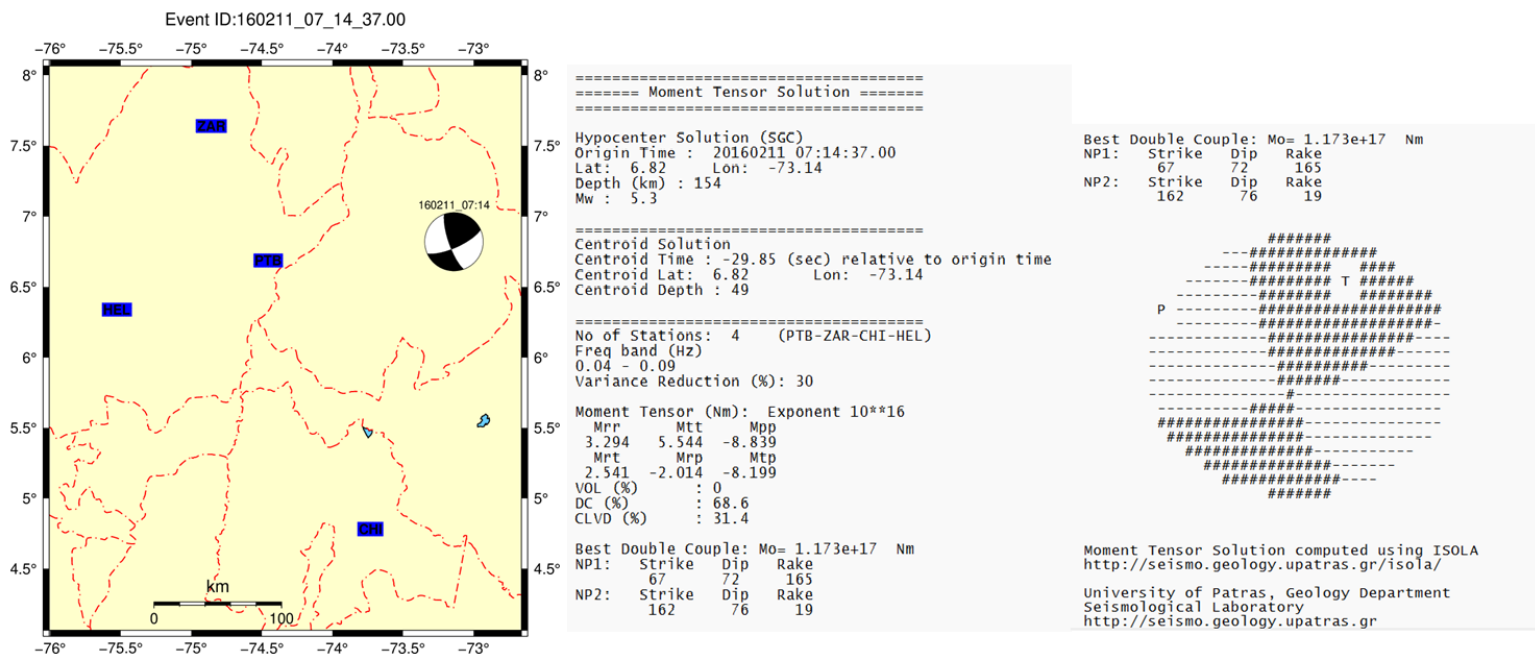


Figura 9. Resultados de la solución deviatorica de tensor de momento sísmico para el evento 1 computada con ISOLA.

6.3 Solución completa de tensor de momento para el evento 2

La solución completa de tensor de momento para el evento 2 se evidencia en la **Figura 10**, donde se obtiene una profundidad de 150 km, momento sísmico (M_0) de 2.948×10^{15} Nm y magnitud de $4.3 M_w$. De las 20 fuentes de prueba sometidas, la solución del tensor corresponde a la fuente de prueba 20 con un time shift de 3.486 seg y reducción de varianza de 0.2. Para las componentes del tensor se presentan los siguientes valores: 20.6% de VOL (volumétrico), 15.2% de DC (doble cupla) y 64.2 % de CLVD (componente de dipolo lineal compensado). El número de estaciones utilizadas para la solución completa de tensor fue de 4 estaciones y corresponden a RUS, PTB, ZAR y CHI, en las que se empleó un rango de baja - alta frecuencia de 0.04 - 0.09 Hz.

El cálculo del tensor de momento sísmico se evidencia en la **ecuación 3**, y las componentes del tensor se muestran en la Tabla 3. Respecto a los planos nodales obtenidos para esta solución, se presenta para el primer plano un rumbo (strike) de 194° , buzamiento (dip) de 13° e inclinación (rake) de 116° . Para el segundo plano se tiene un rumbo (strike) de 347° , buzamiento (dip) de 79° e inclinación (rake) de 84° . El mecanismo focal para este evento corresponde a una falla de tipo oblicua inversa (Fig. 10).

$$M_w = \begin{pmatrix} -0.473 & -0.392 & 2.295 \\ -0.392 & 0.420 & 0.381 \\ 2.295 & 0.381 & -2.420 \end{pmatrix} \times 10^{15} \text{N*m} \quad \text{ecuación 3.}$$

Tabla 3. Componentes del tensor de momento sísmico para la solución completa del evento 2

M_{xx}	M_{yy}	M_{zz}	M_{xy}	M_{yz}	M_{zx}
-0.473 $\times 10^{15}$	0.420 $\times 10^{15}$	-2.420 $\times 10^{15}$	-0.392 $\times 10^{15}$	0.381 $\times 10^{15}$	2.295 $\times 10^{15}$

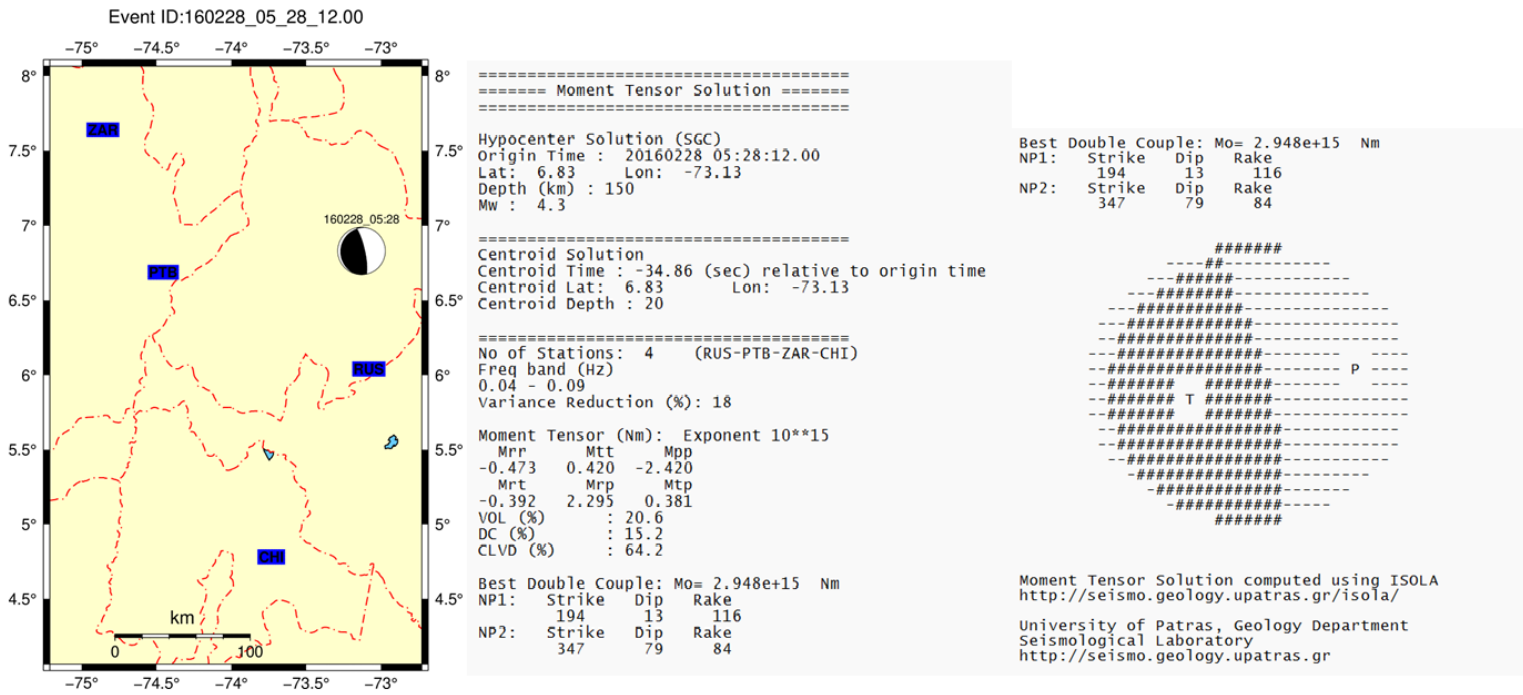


Figura 10. Resultados de la solución completa de tensor de momento sísmico para el evento 2 computada con ISOLA.

6.4 Solución deviatórica de tensor de momento para el evento 2

Para la solución deviatórica mostrada en la **Figura 11**, se destaca profundidad de 150 km, momento sísmico (M_0) de 2.774×10^{15} Nm y magnitud de $4.3 M_w$. De las 20 fuentes de prueba sometidas, la solución del tensor corresponde a la fuente de prueba 20 con un time shift de 3.486 seg y reducción de varianza de 0.2. Las componentes del tensor se distribuyen en los siguientes valores: 0% de VOL (volumétrico), 13.7% de DC (doble cupla) y 86.3 % de CLVD (componente de dipolo lineal compensado). El número de estaciones utilizadas, al igual que para la solución completa de tensor fue de 4 estaciones y corresponden a RUS, PTB, ZAR y CHI, en las que se empleó un rango de baja - alta frecuencia de 0.04 - 0.09 Hz.

El cálculo del tensor de momento sísmico se evidencia en la **ecuación 4**, y las componentes del tensor se muestran en la Tabla 4. Respecto a los planos nodales obtenidos para esta solución, se presenta para el primer plano un rumbo (strike) de 210° , buzamiento (dip) de 14° e inclinación (rake) de 136° . Para el segundo plano se tiene un rumbo (strike) de 343° , buzamiento (dip) de 80° e inclinación (rake) de 80° . El mecanismo focal para este evento evidencia una falla oblicua inversa (Fig. 11).

$$M_w = \begin{pmatrix} 0.185 & -0.416 & 2.296 \\ -0.416 & 1.348 & 0.383 \\ 2.296 & 0.383 & -1.533 \end{pmatrix} \times 10^{15} \text{ N*m} \quad \text{ecuación 4.}$$

M_{xx}	M_{yy}	M_{zz}	M_{xy}	M_{yz}	M_{zx}
0.185	1.348	-1.533	-0.416	0.383	2.296
$\times 10^{15}$	$\times 10^{15}$	$\times 10^{15}$	$\times 10^{15}$	$\times 10^{15}$	$\times 10^{15}$

Tabla 4. Componentes del tensor de momento sísmico para la solución deviatorica del evento 2

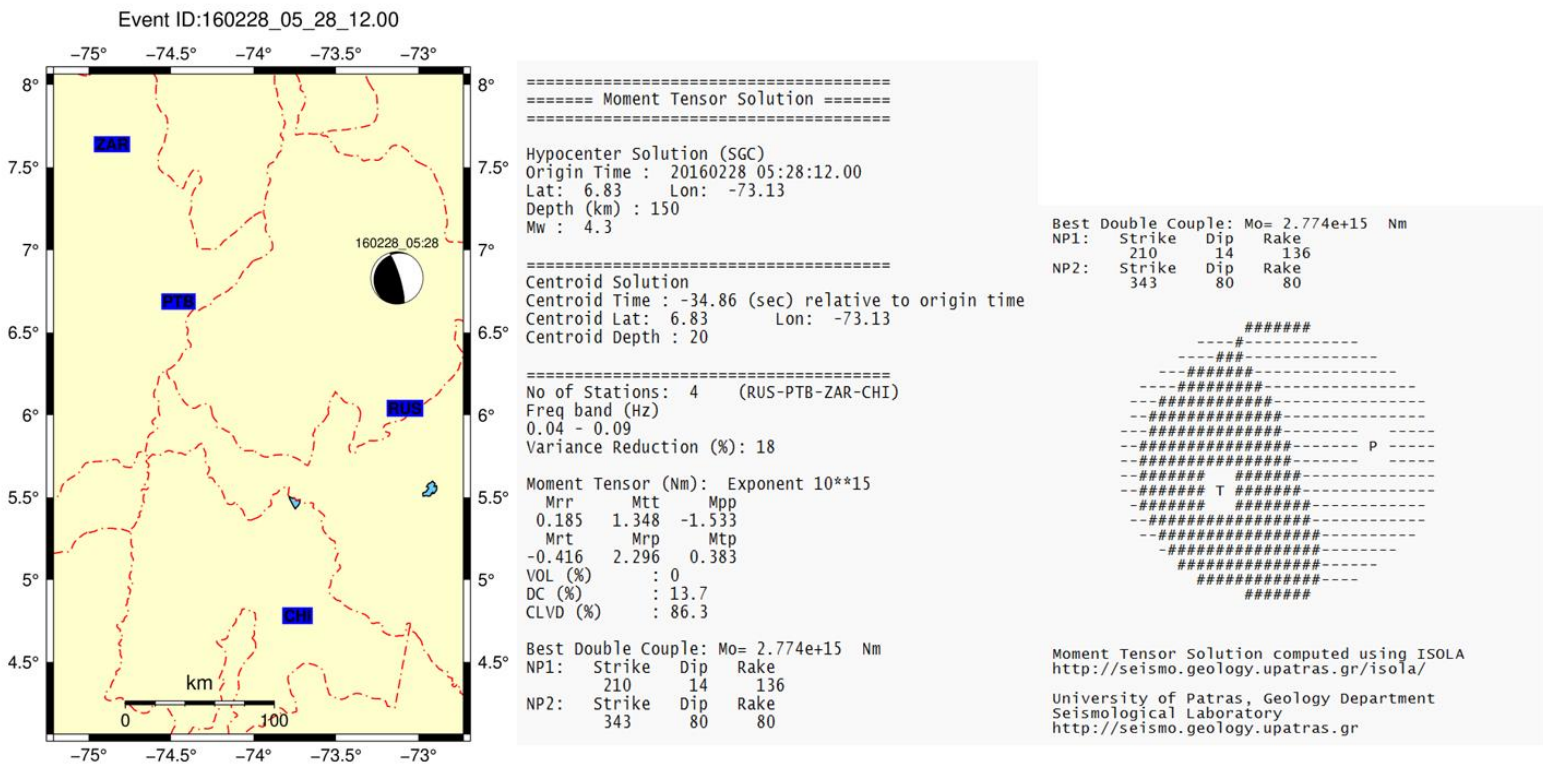


Figura 11. Resultados de la solución deviatorica de tensor de momento sísmico para el evento 2 computada con ISOLA.

7. Análisis de Resultados

La solución con constricción deviatorica para el evento 1 se asemeja en gran medida o se mantiene concordante con los resultados reportados por el Servicio Geológico Colombiano. Se observa similitud en los valores calculados para las componentes del tensor, en la que para el SGC se obtiene la siguiente distribución: 0% de VOL, 58.9% de DC y 41.1% de CLVD, y para la solución propia presente en la Tabla 5, la distribución de componentes se presenta así: 0% de VOL, 68.6% de DC y 31.4% de CLVD. Las componentes DC y CLVD calculadas se mantienen bastante cercanas a las mostradas en la solución presentada por el SGC.

Adicionalmente, existe semejanza en los mecanismos focales obtenidos tanto para la solución propia (Tabla 5) como para la solución presentada por el SGC, en ambas soluciones se representa un tensor de falla inversa. Respecto a los planos nodales en ambas soluciones se presenta similitud en los valores obtenidos de rumbo, buzamiento e inclinación (strike/dip/rake) teniendo para la solución propia (Tabla 5), los planos: 1) 162/ 76/19 y 2) 67/ 72/165 y para la solución del SGC los planos: 1) 177/ 74/ 42 y 2) 73/50/159.

Respecto a la magnitud de momento sísmico (M_0) presente en ambas soluciones, se encuentra gran diferencia en el valor arrojado, ya que en la solución propia se obtiene un momento sísmico de 1.173×10^{17} Nm y para la solución del SGC un momento sísmico de 8.080×10^{15} Nm (Tabla 5). Esta diferencia de escala logarítmica podría estar atribuida preliminarmente a la distancia de las estaciones seleccionadas para el cálculo de la solución y/o al número de estaciones utilizadas. Para la solución propia se utilizaron 4 estaciones (PTB, ZAR, CHI y HEL), y en cambio para la solución del SGC se emplearon 6 estaciones (RUS, PTB, OCA, ZAR, HEL y PTGC).

Para la magnitud M_w se observa una marcada diferencia en los valores obtenidos. El SGC reporta una magnitud de $4.7 M_w$, mientras que en la solución propia se obtiene una magnitud de $5.3 M_w$. Inicialmente, esta diferencia se podría asociar como se mencionó anteriormente a la distancia y el número de estaciones seleccionadas, aunque también se podría vincular a la calidad y respuesta de los sensores, en relación con la sensibilidad de los sismómetros y la sensibilidad de los digitalizadores.

Inversión (Evento 1)	Profundidad	Tiempo de centroide	M_w	M_0	%VOL	%DC	%CLVD	Strike 1	Dip 1	Rake 1	Strike 2	Dip 2	Rake 2
SGC	154.2 km	+1.5 seg	4.7	$8.080 \times 10^{15} Nm$	0	58.9	41.1	177	74	42	73	50	159
Solución propia	154 km	+2.98 seg	5.3	$1.173 \times 10^{17} Nm$	0	68.6	31.4	162	76	19	67	72	165

Tabla 5. Resultados comparativos de la solución deviatorica de tensor de momento para el evento 1.

Del mismo modo, para la solución completa de tensor de momento para el evento 1, se presentan las siguientes componentes del tensor: 60.7% de VOL, 29.2% de DC y 10.1% de CLVD. Cabe destacar que el SGC no presenta solución completa del tensor para este evento, por lo que los resultados mostrados en la Tabla 6, complementan y mejoran la construcción del tensor. En comparación con la solución deviatórica del SGC (Anexo 1) continúa mostrando semejanza en los mecanismos focales obtenidos, se sigue presentando un tensor de falla inversa y de tipo oblicua inversa para la solución completa de tensor de momento.

Respecto al momento sísmico (M_0) obtenido en la solución completa de tensor para el evento 1 se obtiene un valor de 2.425×10^{17} Nm, en cambio para la solución del SGC se reporta un momento sísmico de 8.080×10^{15} Nm. Como se mencionó anteriormente, esta diferencia podría ser explicada por la distancia y el número de estaciones seleccionadas.

Para la magnitud M_w se sigue presentando una notable diferencia en los valores, para la solución propia se obtiene una magnitud de $5.6 M_w$ (Tabla 6), y para la del SGC una magnitud de $4.7 M_w$ (Tabla 5), y como se indicó con anterioridad, se podría atribuir a la calidad y respuesta de los sensores utilizados.

Luego de analizar tanto la solución completa como la deviatórica, el evento 1 correspondiente al sismo del 11 de febrero de 2016 se define con un alto porcentaje de No Doble Cupla (VOL + CLVD).

Inversión (Evento 1)	Profundidad	Tiempo de centroide	M_w	M_0	%VOL	%DC	%CLVD	Strike 1	Dip 1	Rake 1	Strike 2	Dip 2	Rake 2
Solución propia	154 km	+2.98 seg	5.6	$2.425 \times 10^{17} Nm$	60.7	29.2	10.1	66	73	165	160	76	18

Tabla 6. Resultados de la solución completa de tensor de momento para el evento 1.

De igual forma, la solución con construcción deviatórica para el evento 2 muestra cierta variación en las componentes del tensor en comparación con la solución presentada por el SGC para este evento (Tabla 7). Para la solución del SGC, se presenta la siguiente distribución: 0% de VOL, 40.5% de DC y 59.5% de CLVD. En cambio, la solución calculada muestra una distribución con: 0% de VOL, 13.7% de DC y 86.3 % de CLVD. A pesar de no presentar los mismos porcentajes de DC y CLVD, sus valores se mantienen cercanos por lo que se podría indicar que la solución calculada respeta la solución reportada por el SGC.

Se evidencia semejanza en los mecanismos focales obtenidos tanto para la solución propia como para la solución presentada por el SGC, en ambas soluciones se evidencia un tensor de falla inversa, y siendo específico de tipo oblicua inversa.

La magnitud de momento sísmico (M_0) presente en ambas soluciones encuentra similitud en los valores arrojados, ya que en la solución propia se obtiene un momento sísmico de 2.774×10^{15} Nm y para la solución del SGC un momento sísmico de 2.233×10^{15} Nm (Tabla 7). En este caso, la magnitud de momento sísmico se mantuvo en la misma escala logarítmica.

Para la magnitud M_w se observa similitud en los valores, para la solución propia se obtiene una magnitud de 4.3 M_w y para el SGC una magnitud de 4.5 M_w (Tabla 7).

Inversión (Evento 2)	Profundidad	Tiempo de centroide	M_w	M_0	%VOL	%DC	%CLVD	Strike 1	Dip 1	Rake 1	Strike 2	Dip 2	Rake 2
SGC	150 km	+0.3 seg	4.5	2.233×10^{15} Nm	0	40.5	59.5	105	65	44	353	51	147
Solución propia	150 km	+2.98 seg	4.3	2.774×10^{15} Nm	0	13.7	86.3	210	14	136	343	80	80

Tabla 7. Resultados comparativos de la solución deviatorica de tensor de momento para el evento 2.

Respecto a la solución completa de tensor de momento para el evento 2, se presentan las siguientes componentes del tensor: 20.6% de VOL, 15.2% de DC y 64.2 % de CLVD (Tabla 8). Se destaca nuevamente que el SGC no presenta solución completa del tensor para este evento. La solución completa de tensor de momento sigue presentando un tensor de falla inversa y de tipo oblicua inversa y en comparación con la solución deviatorica del SGC (Anexo 2) continúa mostrando semejanza en los mecanismos focales obtenidos.

Para el momento sísmico (M_0) obtenido en la solución completa de tensor se obtiene un valor de 2.948×10^{15} Nm y para la solución del SGC se reporta un momento sísmico de 2.233×10^{15} Nm, se observa proximidad en ambas magnitudes al encontrarse en la misma escala logarítmica.

Al analizar tanto la solución completa como la deviatorica, el evento 2 correspondiente al sismo del 28 de febrero de 2016 se caracteriza con un alto porcentaje de CLVD.

Inversión (Evento 2)	Profundidad	Tiempo de centroide	M_w	M_0	%VOL	%DC	%CLVD	Strike 1	Dip 1	Rake 1	Strike 2	Dip 2	Rake 2
Solución propia	150 km	+3.486 seg	4.3	2.948×10^{15} Nm	20.6	15.2	64.2	194	13	116	347	79	84

Tabla 8. Resultados de la solución completa de tensor de momento para el evento 2.

8. Conclusiones

En conclusión, las soluciones con constricción deviatórica calculadas para los dos eventos coinciden y presentan bastante similitud con las soluciones reportadas por el SGC. Las componentes del tensor en cada una de las soluciones deviatóricas (Fig. 9; Fig. 11) y los mecanismos focales correspondientes, así como los planos nodales se mantienen concordantes con los reportadas por el SGC.

El evento 1 refleja una marcada diferencia en la magnitud de momento sísmico (M_0) y magnitud M_w entre las soluciones calculadas (deviatórica y completa) y la solución reportada por el SGC. Comportamiento opuesto se presenta para el evento 2, donde se observa similitud en los valores obtenidos para las magnitudes de momento sísmico y M_w en relación con la solución reportada por el SGC.

Con respecto a las soluciones completas de tensor de momento para los dos eventos (Fig. 8; Fig. 10) se presenta cierta variación en la distribución porcentual de las componentes del tensor, así como en los planos nodales obtenidos en comparación con las soluciones presentadas por el SGC.

Las soluciones completas de tensor de momento y de constricción deviatórica calculadas para los dos eventos contribuyen fundamentalmente a caracterizar tanto las componentes del tensor como cada uno de sus mecanismos focales, determinando así que los dos eventos destacan por evidenciar altos componentes de No Doble Cupla.

Se recomienda aumentar el número de estaciones utilizadas para el cómputo de las soluciones deviatóricas y completas de tensor de momento para los dos eventos, en virtud de alcanzar valores de momento sísmico más cercanos a los reportados en las soluciones del SGC. Específicamente, sería pasar de 4 estaciones a emplear 6 estaciones revisando con mayor detalle las distancias entre cada una de las estaciones y la distancia de cada estación respecto al evento sísmico. También se recomienda aumentar el número de fuentes de prueba ejecutadas en cada solución pasando de 20 fuentes a 40 fuentes de prueba, y así obtener planos nodales con valores de rumbo, buzamiento e inclinación mayormente concordantes con los presentados por el Servicio Geológico Colombiano.

9. Referencias

- Cortés, M., & Angelier, J. (2005). Current states of stress in the northern Andes as indicated by focal mechanisms of earthquakes. *Tectonophysics*, 403(1-4), 29-58.
- Frohlich, C., & Willemann, R. J. (1987). Aftershocks of deep earthquakes do not occur preferentially on nodal planes of focal mechanisms. *Nature*, 329(6134), 41-42.
- Frohlich, C. (1994). Earthquakes with non—double-couple mechanisms. *Science*, 264(5160), 804-809.
- Frohlich, C. (1995). Characteristics of well-determined non-double-couple earthquakes in the Harvard CMT catalog. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 91(4), 213-228.
- Frohlich, C., Kadinsky-Cade, K., & Davis, S. D. (1995). A reexamination of the Bucaramanga, Colombia, earthquake nest. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85(6), 1622-1634.
- Frohlich, C. (2006). *Deep Earthquakes*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Frohlich, C., & Nakamura, Y. (2009). The physical mechanisms of deep moonquakes and intermediate-depth earthquakes: How similar and how different?. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 173(3-4), 365-374.
- Gilbert, G. K. (1884). A theory of earthquake of the Great Basin, with a practical application [from the Salt Lake Tribune of Sept 20, 1883], *Am. J. Sci.* 27, 4953.
- Hilst, R. V. D., & Mann, P. (1994). Tectonic implications of tomographic images of subducted lithosphere beneath northwestern South America. *Geology*, 22(5), 451-454.
- Hurukawa, N., & Imoto, M. (1993). A non double-couple earthquake in a subducting oceanic crust of the Philippine Sea plate. *Journal of Physics of the Earth*, 41(4), 257-269.
- Julian, B. R. (1983). Evidence for dyke intrusion earthquake mechanisms near Long Valley caldera, California. *Nature*, 303(5915), 323-325.
- Julian, B. R., & Sipkin, S. A. (1985). Earthquake processes in the Long Valley caldera area, California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 90(B13), 11155-11169.

- Julian, B. R., Miller, A. D., & Foulger, G. R. (1997). Non-double-couple earthquake mechanisms at the Hengill-Grensdalur volcanic complex, southwest Iceland. *Geophysical Research Letters*, 24(7), 743-746.
- Julian, B. R., Miller, A. D., & Foulger, G. R. (1998). Non-double-couple earthquakes 1. Theory. *Reviews of Geophysics*, 36(4), 525-549.
- Kanamori, H., Given, J. W., & Lay, T. (1984). Analysis of seismic body waves excited by the Mount St. Helens eruption of May 18, 1980. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B3), 1856-1866.
- Kanamori, H., Ekström, G., Dziewonski, A., Barker, J. S., & Sipkin, S. A. (1993). Seismic radiation by magma injection: An anomalous seismic event near Tori Shima, Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 98(B4), 6511-6522.
- Kikuchi, M., & Kanamori, H. (1991). Inversion of complex body waves—III. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 81(6), 2335-2350.
- Kubas, A., & Sipkin, S. A. (1987). Non-double-couple earthquake mechanisms in the Nazca Plate Subduction Zone. *Geophysical Research Letters*, 14(4), 339-342.
- Lawson, A. C. (1908). The California earthquake of April 18, 1906: report of the state earthquake investigation commission, in two volumes and atlas (No. 87). Carnegie institution of Washington.
- Lay, T., & Wallace, T. C. (1995). *Modern global seismology*. Elsevier.
- López Angarita, G. A. (2011). Escalamiento de fuente sísmica en el nido de Bucaramanga.
- Miller, A. D., Foulger, G. R., & Julian, B. R. (1998). Non-double-couple earthquakes 2. Observations. *Reviews of Geophysics*, 36(4), 551-568.
- Moreno, W. E. G. (2018). Analysis of Colombian Seismicity as a Way to Explain and Understand The Bucaramanga Nest. *Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology*, 3(3), 134-140.
- Ojeda, A., & Havskov, J. (2001). Crustal structure and local seismicity in Colombia. *Journal of seismology*, 5(4), 575-593.
- Pennington, W. D. (1983). Role of shallow phase changes in the subduction of oceanic crust. *Science*, 220(4601), 1045-1047.

Perico-Martínez, N. R., & Perico-Granados, N. R. (2014). Caracterización y recurrencia sísmica del nido de Bucaramanga. *L'esprit Ingénieux*, 5(1).

Salcedo-Hurtado, E de J. (1995). Deformación Sísmica en las Zonas Sismoactivas de Choco y El " Nido " de Bucaramanga (Colombia). *Boletín Geológico*, 35(1), 50-68.

Salcedo-Hurtado, E de J. (1999). Estudio de sismicidad histórica en la región de Bucaramanga (Colombia). *Rev. Acad. Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 23, 87, 233-248, ISSN 0370-3908.

Schneider, J. F., Pennington, W. D., & Meyer, R. P. (1987). Microseismicity and focal mechanisms of the intermediate-depth Bucaramanga Nest, Colombia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 92(B13), 13913-13926.

Sepúlveda-Jaimes, F. J., & Cabrera-Zambrano, F. H. (2018). Tomografía sísmica 3D del nido sísmico de Bucaramanga (Colombia). *Boletín de Geología*, 40(2), 15-33.

SGC (Servicio Geológico Colombiano) (2022). Catálogo Mecanismo Focal y Tensor de Momento Sísmico. Disponible en línea:

http://bdrsnc.sgc.gov.co/sismologia1/sismologia/focal_seiscomp_3/solucion_isola.php?anio=2016&id_sismo=SGC2016cxlz (última visita noviembre 2022).

Sokos, E. N., & Zahradnik, J. (2008). ISOLA a Fortran code and a Matlab GUI to perform multiple-point source inversion of seismic data. *Computers & Geosciences*, 34(8), 967-977

Sokos, E., & Zahradník, J. (2013). Evaluating centroid-moment-tensor uncertainty in the new version of ISOLA software. *Seismological Research Letters*, 84(4), 656-665.

Taboada, A., Rivera, L. A., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Philip, H., Bijwaard, H., ... & Rivera, C. (2000). Geodynamics of the northern Andes: Subductions and intracontinental deformation (Colombia). *Tectonics*, 19(5), 787-813.

Vallina, A. U., Udías, A., & Buforn, E. (2018). *Principles of seismology*. Cambridge University Press.

Vargas, C. A. (2004). Propagación de ondas sísmicas y atenuación de ondas de coda en el territorio colombiano.

Vásquez Pachón, D. A. (2019). Estudio de orientación de esfuerzos sísmicos en el nido de Bucaramanga.

Yepes Vivas, M. D. M. (2011). Comportamiento temporal de terremotos de profundidad intermedia en el Nido de Bucaramanga.

Zarifi, Z., & Havskov, J. (2003). Characteristics of dense nests of deep and intermediate-depth seismicity. *Advances in geophysics*, 46, 238-278.

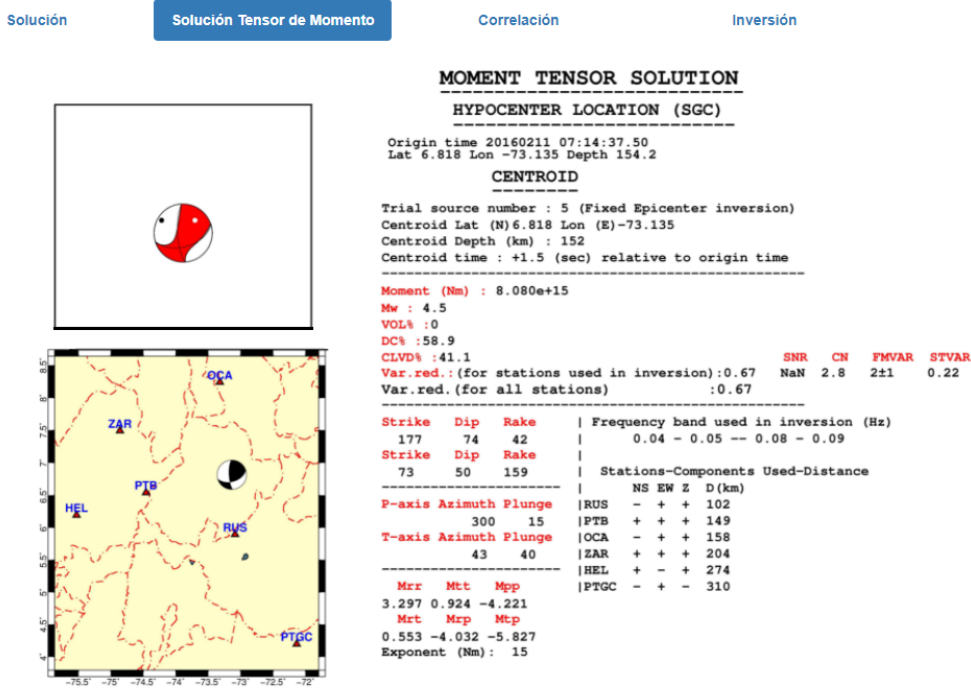
Zarifi, Z., Havskov, J., & Hanyga, A. (2007). An insight into the Bucaramanga nest. *Tectonophysics*, 443(1-2), 93-105.

ANEXOS

Soluciones originales del Servicio Geológico Colombiano con constricción deviatorica para los sismos escogidos.

ISOLA

Los Santos - Santander, Colombia. M 4.7 - 154.2 Km
2016-02-11 07:14:37 UTC



Resultados de la inversión del Tensor Momento sísmico.

LOCALIZACIÓN HIPOCENTRO:

- Región: Los Santos - Santander, Colombia
- Fecha Hora UTC: 2016-02-11 07:14:37
- Magnitud: 4.7
- Agencia: SGC
- Latitud: 6.82°
- Longitud: -73.14°
- Profundidad: 154Km

MÉTODO: ISOLA
SOLUCIÓN TENSOR MOMENTO:

- Latitud centroide: 6.818°
- Longitud centroide: -73.135°
- Profundidad centroide: 152Km
- Magnitud: 4.5Mw

PLANOS NODALES:

Plano 1:

- Strike: 177°
- Dip: 74°
- Rake: 42°

Plano 2:

- Strike: 73°
- Dip: 50°
- Rake: 159°

[Más Información +](#)

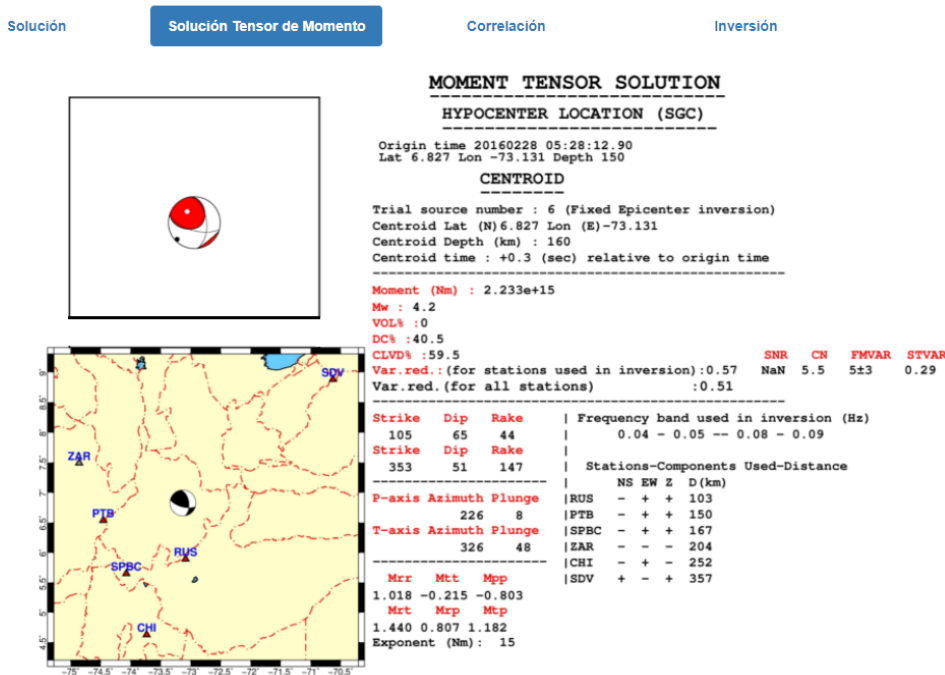
Anexo 1. Solución de Tensor de Momento Sísmico con constricción deviatorica para el evento 1 por el Método ISOLA, según el Catálogo de Mecanismos Focales y Tensores de Momento Sísmico del Servicio Geológico Colombiano.

Tomada de: http://bdrsnc.sgc.gov.co/sismologia1/sismologia/focal_seiscomp_3/index.html

ISOLA

Los Santos - Santander, Colombia. M 4.5 - 150 Km

2016-02-28 05:28:12 UTC



LOCALIZACIÓN HIPOCENTRO:

- Región: Los Santos - Santander, Colombia
- Fecha Hora UTC: 2016-02-28 05:28:12
- Magnitud: 4.5
- Agencia: SGC
- Latitud: 6.83°
- Longitud: -73.13°
- Profundidad: 150Km

MÉTODO: ISOLA

SOLUCIÓN TENSOR MOMENTO:

- Latitud centroide: 6.827°
- Longitud centroide: -73.131°
- Profundidad centroide: 160Km
- Magnitud: 4.2Mw

PLANOS NODALES:

Plano 1:

- Strike: 105°
- Dip: 65°
- Rake: 44°

Plano 2:

- Strike: 353°
- Dip: 51°
- Rake: 147°

[Más Información +](#)

Resultados de la inversión del Tensor Momento sísmico.

Anexo 2. Solución de Tensor de Momento Sísmico para el segundo sismo por el Método ISOLA, según el Catálogo de Mecanismos Focales y Tensores de Momento Sísmico del Servicio Geológico Colombiano.

Tomada de: http://bdrsnc.sgc.gov.co/sismologia1/sismologia/focal_seiscomp_3/index.html