

Inversión del tensor de momentos de eventos pertenecientes al nido sísmico de Bucaramanga
utilizando datos regionales

William Eduardo Peñaranda Arévalo

Trabajo de Grado para Optar al Título de Magister en Geofísica

Director(a)

Rocio Bernal Olaya

Geóloga Ph.D.

Codirector

Wu-Cheng Chi

Geólogo Ph.D.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias

Escuela de Física

Maestría en Geofísica

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

A Dios, quien me ha otorgado la oportunidad de estar aquí y me ha dotado con las cualidades necesarias para cumplir a cabalidad esta tarea siguiendo su divina providencia. A mis padres William y Ruth Marina, quienes me han apoyado con sus consejos, compañía y su amor incondicional. A mi hermano William Andrés, quien ha sido vital para el desarrollo académico que he tenido y quien me ha ayudado con la comprensión de los conceptos físicos e informáticos necesarios para el desarrollo de esta investigación. A mis familiares y primos, quienes siempre han creído en mis capacidades y han sido una fuente de motivación permanente. A mis compañeros de maestría, Pablo, Lorena y Álvaro, quienes han sido participes directa e indirectamente del proceso de formación de Magister que hemos emprendido desde principios del 2020.

Agradecimientos

A Dios y a mi familia por haberme acompañado y apoyado durante el desarrollo de la presente investigación.

A mi directora de tesis, la Profesora Rocío Bernal Olaya por su dedicación en la enseñanza y asesoría, tanto en el ámbito académico como en el ámbito profesional en esta temática del área de Sismología traída por el Dr. Wu-Cheng Chi a la escuela de Geología de la UIS en años anteriores.

Al Dr. Wu-Cheng Chi, por haberse convertido en mi mentor en dicha temática, dedicando tiempo para enseñarme y prestando asesoramiento durante el transcurso de investigación en el ámbito académico y profesional desde mi estancia en la Academia Sinica desarrollando mi pasantía de investigación en 2019.

Al Servicio Geológico Colombiano (SGC), por tener la disponibilidad del conjunto de datos de los sismos del nido de Bucaramanga registrados por las estaciones de la red sismológica nacional de Colombia (RSNC) y los archivos de respuesta instrumental de cada estación.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Objetivos.....	16
1.1 Objetivo General.....	16
1.2 Objetivos Específicos.....	16
2. Metodología y Análisis	17
3. Resultados	23
4.1 Mecanismos Focales	25
4.2 Comparación de las soluciones con los catálogos del GCMT y SGC	33
4.3 Polaridad invertida.....	38
4. Discusión.....	40
5. Conclusiones	47
6. Recomendaciones	49
Referencias Bibliográficas	50
Apéndices.....	58

Lista de Tablas

	Pág.
<i>Tabla 1. Modelo de velocidad 1-D de Fandiño.....</i>	21
<i>Tabla 2. Modelo de velocidad 1-D IASPEI91 modificado</i>	22
<i>Tabla 3. Modelo de velocidad 1-D de Ojeda.....</i>	23

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Mapa tectónico regional resaltando las principales fallas activas donde se localiza el área de estudio.</i>	13
Figura 2. <i>Vista en planta de las soluciones del tensor de momentos de los eventos del nido sísmico de Bucaramanga.</i>	26
Figura 3. <i>Grafica de las orientaciones de los ejes P, T y B de los mecanismos focales correspondientes a los sismos analizados.</i>	27
Figura 4. <i>Gráfica del porcentaje de componente CLVD en función de la profundidad del centroide.</i>	28
Figura 5. <i>Secciones cruzadas verticales en dirección occidente-oriente (izquierda) y sur-norte (derecha) de los mecanismos focales obtenidos para los sismos analizados del nido sísmico de Bucaramanga en función de la profundidad del centroide.</i>	29
Figura 6. <i>Secciones cruzadas verticales en dirección noroccidente-suroriente (izquierda) y suroccidente-nororiente (derecha) de los mecanismos focales obtenidos para los sismos analizados del nido sísmico de Bucaramanga en función de la profundidad del centroide.</i> 30	
Figura 7. <i>Secciones cruzadas verticales en dirección occidente-oriente (izquierda) y sur-norte (derecha) de los mecanismos focales obtenidos para los sismos analizados del nido sísmico de Bucaramanga en función de la profundidad hipocentral.</i>	31
Figura 8. <i>Secciones cruzadas verticales en dirección noroccidente-suroriente (izquierda) y suroccidente-nororiente (derecha) de los mecanismos focales obtenidos para los sismos analizados del nido sísmico de Bucaramanga en función de la profundidad hipocentral.</i> ..	32

- Figura 9. *Gráfico de los valores calculados del ángulo de Kagan para los eventos comunes entre el catálogo del GCMT vs la magnitud M_w y la profundidad de los centroides obtenidos en este estudio.*..... 34
- Figura 10. *Gráfico de los valores calculados del ángulo de Kagan para los eventos comunes entre el catálogo del SGC vs la magnitud M_w y la profundidad de los centroides obtenidos en este estudio.* 34
- Figura 11. *Comparación de las magnitudes de momento (M_w) reportadas por el catálogo del GCMT y los resultados obtenidos en este estudio.* 35
- Figura 12. *Comparación de las magnitudes de momento (M_w) reportadas por el catálogo del SGC y los resultados obtenidos en este estudio.*..... 36
- Figura 13. *Comparación del momento sísmico (M_o) para los eventos comunes entre los catálogos del SGC (Izquierda) y GCMT (derecha) con los resultados obtenidos en este estudio.* 36
- Figura 14. *Vista en planta mostrando la comparación de las soluciones del tensor de momentos obtenidas en este estudio con las soluciones reportadas por los catálogos del GCMT, SGC y otros estudios.* 37
- Figura 15. *Sismogramas de polaridad normal e invertida para los sismos del 09/03/2016 y 31/05/2018 con mecanismos focales de tipo inverso y normal respectivamente.*..... 39
- Figura 16. *Ejemplo de un ajuste de sismogramas para un mecanismo focal de tipo strike-slip del sismo 2013/07/25.* 41
- Figura 17. *Ejemplo de un ajuste de sismogramas para un mecanismo focal de tipo inverso del sismo 2016/03/09.* 42
- Figura 18. *Ejemplo de un ajuste de sismogramas para un mecanismo focal de tipo normal del sismo 2018/05/31.* 43

Figura 19. *Diagrama esquemático de los mecanismos focales esperados para algunos de los escenarios tectónicos propuestos para el nido sísmico de Bucaramanga y sus alrededores.*

..... 46

Lista de Apéndices

	Pág
Apéndice A. Parámetros de fuente de los sismos pertenecientes al nido de Bucaramanga analizados.....	58

Resumen

Título: Inversión del tensor de momentos de eventos pertenecientes al nido sísmico de Bucaramanga utilizando datos regionales*

Autor: William Eduardo Peñaranda Arévalo (1), Ph.D. Wu-Cheng Chi. (2) y Ph.D. Rocio Bernal Olaya (3)**

Palabras Clave: Norte de los Andes, Nido sísmico de Bucaramanga, datos regionales de banda ancha, Inversión del tensor de momentos, sismos de profundidad intermedia.

Descripción: El nido sísmico de Bucaramanga es la zona de sismicidad de profundidad intermedia más activa alrededor del mundo. Sin embargo, hacen falta estudios cinemáticos detallados y sistemáticos de fuente puntual del nido. En este trabajo, nosotros realizamos inversiones del tensor de momentos de onda completa de 30 sismos de magnitudes $M \geq 4.0$ entre 2009 y 2020 usando datos regionales registrados por la red sismológica Nacional de Colombia (RSNC). Estos eventos poco convencionales predominantemente muestran ejes de compresión P , subparalelos a las direcciones de convergencia de las placas Caribe y Nazca. No obstante, se obtuvo un amplio rango de diversos mecanismos focales, exhibiendo cinemáticas co-sísmicas muy heterogéneas dentro del nido sísmico. Los mecanismos focales son más consistentes con un modelo de desgarre de placa, con porciones no conocidas de doblamiento de placa o incluso una cantidad pequeña de colisión de placas. El test Fisher (F) muestra que los componentes isotrópicos no son necesarios para explicar el ajuste de los sismogramas observados. Sin embargo, para eventos con profundidades mayores a 160 km, se evidenció un incremento de la componente CLVD en función de la profundidad, posiblemente relacionado a fluidos o cambios en la reología, por ej. dehydration embrittlement en la parte baja del nido. Este estudio documenta probablemente los más diversos y localizados patrones de deformación cosísmicos a profundidades intermedias que son iluminadas por las formas de onda sísmicas.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ciencias. Escuela de Física. Maestría en Geofísica. Director(a): Rocio Bernal Olaya. Geóloga Ph.D. Codirector: Wu-Cheng Chi. Geólogo Ph.D.

Abstract

Title: Moment tensor inversions of Bucaramanga nest events using regional waveforms*

Author(s): William Eduardo Peñaranda Arévalo (1), Ph.D. Wu-Cheng Chi. (2) y Ph.D. Rocio Bernal Olaya (3)**

Key Words: North Andes, Bucaramanga nest, Regional broadband waveforms, Moment tensor inversions, Intermediate-depth earthquakes.

Description: Bucaramanga nest is the most active intermediate-depth seismic zone worldwide. However, detailed and systematic point source kinematic studies of this nest are lacking. Here we conduct regional full-waveform moment tensor inversions of 30 $M \geq 4.0$ between 2009 and 2020 using regional waveforms recorded by Colombian National Seismological Network. Those rare events show mostly consistent P-axis, subparallel to the convergent directions of Nazca and Caribbean plates. However, wide ranges of different focal mechanisms were derived, showing very heterogeneous coseismic kinematic within this dense nest. The focal mechanisms are more consistent with the slab tear model, with unknown portion of slab bending or even small amount of plate collision. F-tests show that isotropic component is not needed to explain the waveform fits. However, for events deeper than 160 km, we found increasing CLVD component with depth, possibly related to fluids, or changes in rheology, e.g. dehydration embrittlement, in the lower nest. This study documents probably the most diverse and localized coseismic strain patterns at intermediate depth that are illuminated by seismic waveforms.

* Master Thesis

** Science Faculty. Physics school. Master in Geophysics. Director(a): Rocio Bernal Olaya. Geologist Ph.D. Codirector: Wu-Cheng Chi. Geologist Ph.D.

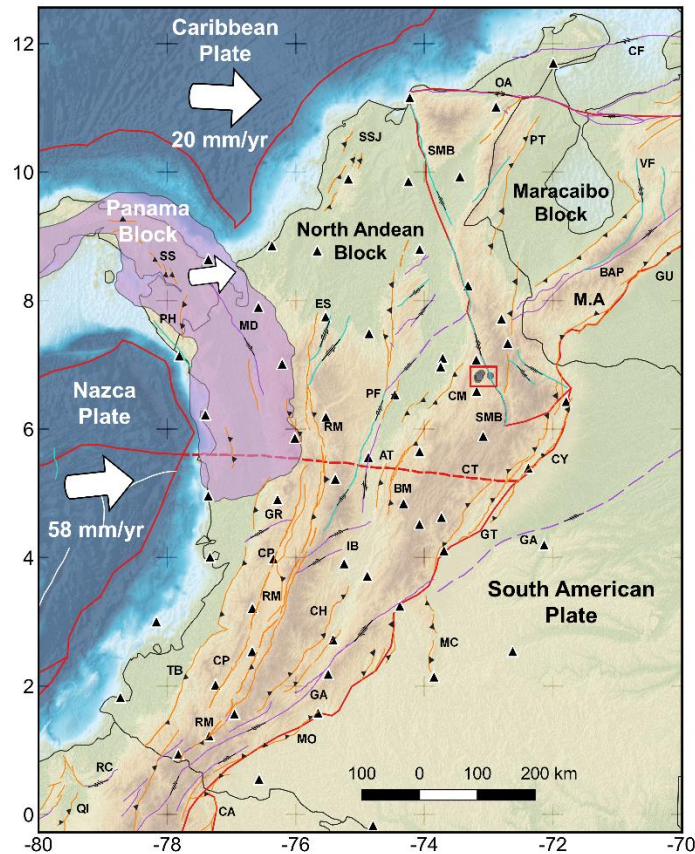
Introducción

A lo largo de la margen noroccidental del Suramérica se presenta la concurrencia de tres placas tectónicas, Caribe con un espesor mayor que el de una placa oceánica normal (Burke, 1988; Mora et al., 2017; Kellogg et al., 2019) y Nazca, ambas siendo placas de afinidad oceánica convergiendo con la placa de Suramérica al norte y el occidente respectivamente, configurando un marco tectónico complejo. Además, en esta región se encuentra el nido sísmico de Bucaramanga, uno de los tres nidos sísmicos más famosos del mundo, localizado al nororiente de Colombia centrado sobre las coordenadas 6.8°N y 73.1°W a profundidades intermedias (ver Figura 1) (Tryggvason and Lawson, 1970; Schneider et al., 1987; Frohlich et al., 1995; Ojeda and Havskov, 2001; Zarifi and Havskov, 2003).

El termino nido sísmico fue propuesto por Richter, (1958), como un volumen de actividad sísmica intensa que está aislado de otra actividad cercana. El primer autor que probablemente usó el termino de nido sísmico fue Santo (1969a, b) para referirse a la concentración inusual de sismos de profundidad intermedia localizada entre los municipios Cepitá, Umpala y Los Santos cercanos a la ciudad de Bucaramanga (Schneider et al., 1987). Posteriormente Prieto et al. (2012) propuso la definición de “earthquake nest” (nido de sismos) para representar una particular clase de concentración de sismicidad de profundidad intermedia que ha sido observada por un periodo largo de tiempo refiriéndose principalmente a los tres nidos sísmicos más famosos (Hindu Kush, Vrancea y Bucaramanga). La tasa de actividad de un nido es mayor y más persistente a lo largo del tiempo que en sus áreas circundantes.

Figura 1.

Mapa tectónico regional resaltando las principales fallas activas donde se localiza el área de estudio.



Nota. Localización del área de estudio (cuadrado rojo), sismos estudiados (puntos grises), estaciones (triángulos negros) de la red sismológica nacional de Colombia (RSNC) y las fallas activas reportadas por [Veloza et al. \(2012\)](#). Las líneas naranjas indican fallas de cabalgamiento, cian son las fallas de rumbo de tipo sinistral y las líneas púrpuras son las fallas de rumbo de tipo dextral. **M.A.**, Andes de Merida; **SSJ**, Sistema de fallas Sinu-San Jacinto; **SMB**, Sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta; **OA**, Falla de Oca-Ancon; **CF**, Falla de Cuisa; **PT**, Sistema de fallas Perijá-El Tigre; **VF**, Sistema de fallas Valera; **GU**, Falla de Guanaré; **BAP**, Sistema de fallas Boconó-Ancón-El Pilar; **CM**, Falla de cimitarra; **CY**, Sistema de fallas Cuisana-Yopal; **GT**, Falla de cabalgamiento de Guaicaramo; **AT**, Falla de Alto del trigo; **BM**, Falla de Bituima; **IB**, falla de Ibagué; **PF**, Falla de Palestina; **GA**, Sistema de fallas Guayaquil-Algeciras; **MC**, Sistema de fallas La Macarena; **CH**, Sistema de fallas Chusma; **RM**, Sistema de fallas Romeral; **ES**, Falla del Espíritu Santo; **MD**, Falla de Murindó; **PH**, Sistema de fallas Pierre Hills; **SS**, Sistema de fallas Sanson; **GR**, Falla de Garrapatas; **CP**, Falla de Cali-Patia; **TB**, Falla de Tambor; **MO**, Falla de Mocoa; **RC**, Falla de Rio Canandé; **CA**, Sistema de fallas Cascales. La línea roja punteada indica la ubicación de la discontinuidad propuesta como Caldas tear, **CT**.

Un nido es diferente de un enjambre de sismos y de secuencias de réplicas ya que las primeras tienen una alta tasa de actividad después del evento principal, pero finalizan después de un cierto periodo de tiempo (Pavlis and Das, 2000) mientras que los enjambres son áreas concentradas de sismicidad intensa, pero están ubicadas en un periodo corto de tiempo, de días hasta meses, con intervalos amplios de tiempo entre eventos y sin predominancia de un sismo principal, incluso el enjambre puede pertenecer al nido (Richter, 1958; Špičák, 2000; Zarifi & Havskov, 2003; Prieto et al., 2012).

El entendimiento del nido sísmico de Bucaramanga es un punto clave para resolver el debate acerca del marco tectónico de las placas subducidas debajo del Norte de los Andes, especialmente debido a la falta de delimitaciones de las estructuras más profundas. Hay una variedad de modelos competentes que explican la configuración tectónica del nido (Christeson et al., 2008; Cortes and Angelier, 2005; Higgs, 2009; Pennington et al., 1979; Pindell and Kennan, 2009; Suter et al., 2008; Taboada et al., 2000; Van der Hilst and Mann, 1994; Zarifi et al., 2007; Prieto et al., 2012; Chiarabba et al., 2016; Kellogg et al., 2019; Sun et al., 2022). Aunque los modelos difieren en gran medida, pueden ser agrupados en la interpretación de la sismicidad del nido de Bucaramanga como: Ocurre dentro de la placa Caribe (e.g. Taboada et al., 2000; Cortes and Angelier, 2005; Prieto et al., 2012; Kellogg et al., 2019; Sun et al., 2022), dentro de la placa Nazca (e.g. Chiarabba et al., 2016; Syracuse et al., 2016) y en el límite de las dos placas (Van der Hilst and Mann, 1994; Zarifi et al., 2007).

Estudios previos (e.g. Cortes and Angelier, 2005; Zarifi et al., 2007; Prieto et al., 2012) exitosamente han aportado luces sobre los parámetros de fuente y los mecanismos focales de los

sismos de profundidad intermedia pertenecientes al nido sísmico de Bucaramanga principalmente de los catálogos del GCMT (Global Centroid Moment Tensor, [Ekström et al., 2012](#); [Harvard, 2002](#)) y USGS (United States Geological Survey, [Sipkin, 2002](#); [USGS, 2000](#)) utilizando datos de sismogramas telesísmicos y primer arribo de la onda P. Aunque, estos trabajos tienen una limitación en la magnitud de los sismos analizados debido a que solo estudiaron eventos de gran magnitud ($M_w \geq 5.0$). Recientemente, el servicio geológico colombiano (SGC) realizó múltiples inversiones construyendo un catálogo de soluciones del tensor de momentos con sismos desde 2014 al presente y con magnitudes superiores ($M_w > 4.0$).

En este trabajo, se quiere contribuir al mejor entendimiento de los parámetros de fuente y completar el catálogo de eventos con $M_w \geq 4.0$ en el área de estudio realizando inversiones del tensor de momentos en el dominio del tiempo de los sismos del nido sísmico de Bucaramanga utilizando sismogramas de alta calidad recolectados por las estaciones banda ancha de la red sismológica nacional de Colombia (RSNC). Se probó el comportamiento de los tres diferentes modelos de velocidad 1-D propuestos para la región de estudio. Luego se ejecutaron dos tipos de inversión del tensor de momentos separadas: deviatoria y completa con el objetivo de estudiar las posibles componentes CLVD e isotrópicas de dichos eventos. Posteriormente, se interpretaron los resultados con respecto a los modelos de generación de sismos a profundidades intermedias disponibles actualmente. Adicionalmente, se usará los resultados de inversión para rellenar los espacios en los catálogos de las redes nacionales y globales, extendiendo la base de datos de los mecanismos focales regionales y contribuyendo al entendimiento del marco tectónico donde se localiza el nido sísmico de Bucaramanga.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Generar un catálogo de mecanismos focales de mínimo 20 sismos pertenecientes al nido sísmico de Bucaramanga con magnitudes $M_L \geq 4.0$, a través del método de inversión del tensor de momentos de onda completa.

1.2 Objetivos Específicos

Definir un modelo de velocidad 1D útil para el proceso de inversión a partir de los modelos de velocidad 1D publicados para la región.

Obtener una muestra de los parámetros de las fuentes sísmicas de sismos pertenecientes al nido sísmico de Bucaramanga con hipocentros en el rango de profundidades intermedias (50-350 km) a través de la inversión del tensor de momentos de onda completa siguiendo la metodología propuesta por Dreger (2003, 2011).

2. Metodología y Análisis

Para el desarrollo de las inversiones del tensor de momentos, fueron seleccionados sismos de profundidad intermedia localizados en el nido sísmico de Bucaramanga con magnitudes $M_L \geq 4.0$. Los datos de los sismogramas observados fueron recolectados de las estaciones banda ancha de la red sismológica Nacional de Colombia (RSNC) operada por el servicio Geológico Colombiano (SGC).

Fue empleada la inversión del tensor de momentos en el dominio del tiempo de sismogramas regionales siguiendo la formulación propuesta en la [ecuación 1](#):

$$U_n(x, t) = G_{ni,j} * M_{ij} \quad (1)$$

donde $U_n(x, t)$ es la historia del tiempo observado de la n-ésima componente del movimiento del suelo en una localización espacial proyectada debido a una fuente puntual, $G_{ni,j}$ son las funciones de Green que describen una respuesta elastodinámica para un doble par de fuerzas (double couple) debido a un impulso unitario, y M_{ij} son los elementos del tensor de momentos que describen la fuerza de los doble par de fuerzas (double couple). Los pares de fuerzas generales para una fuente puntual deviatoria pueden ser representados por las funciones de Green para las tres fallas sintéticas fundamentales: 1) una falla vertical strike-slip, 2) una falla vertical dip-slip y una falla vertical dip-slip con un azimut y buzamiento de 45° ([Lay and Wallace, 1995](#); [after Langston, 1981](#)). Los movimientos del suelo pueden ser expresados como una combinación ponderada de las funciones de Green usando la formulación propuesta por [Minson and Dreger](#)

(2008) (after [Herrmann and Wang, 1985](#)) para un esquema de inversión del tensor de momentos completa a continuación:

$$\mu_Z = A_1^* \cdot ZSS + A_2^* \cdot ZDS + A_3^* \cdot ZDD + M_{iso} \cdot ZEP \quad (2)$$

$$\mu_R = A_1^* \cdot RSS + A_2^* \cdot ZDS + A_3^* \cdot RDD + M_{iso} \cdot REP \quad (3)$$

$$\mu_T = A_4^* \cdot TSS + A_5^* \cdot TDS \quad (4)$$

$$M_{iso} = \frac{tr(M)}{3} \quad (5)$$

donde μ_Z es el desplazamiento vertical, μ_R es el desplazamiento radial, μ_T es el desplazamiento tangencial del suelo. SS indica la función de Green para un mecanismo focal de falla strike-slip, DS es la función de Green para una falla vertical dip-slip, DD es la función de Green para un mecanismo focal para la falla vertical con azimut y buzamiento a 45° y EP es la función explosiva de Green. Estas son las funciones de Green requeridas para calcular un campo de onda debido a una fuente de dislocación puntual arbitraria enterrada en un medio de capas horizontales. Los coeficientes A_i^* son construidos de los elementos de la parte deviatoria del tensor de momentos completo ([Minson and Dreger, 2008](#)) como:

$$A_1^* = A_1 = \frac{1}{2}(M_{xx} - M_{yy}) \cos(2az) + M_{xy} \sin(2az) \quad (6)$$

$$A_2^* = A_2 = M_{xx} \cos(az) + M_{yy} \sin(az) \quad (7)$$

$$A_3^* = -\frac{1}{6}(M_{xx} + M_{yy} - 2M_{zz}) \quad (8)$$

$$A_4^* = A_4 = \frac{1}{2} (M_{xx} - M_{yy}) \sin(2az) - M_{xy} \cos(2az) \quad (9)$$

$$A_5^* = A_5 = -M_{yz} \cos(az) + M_{xz} \sin(az) \quad (10)$$

Cuando la fuente es puramente deviatoria, los coeficientes A_i^* de las ecuaciones (6) a (10) pueden ser construidos para un tensor de momentos deviatorio manteniendo la formulación (A_i) de [Jost and Herrmann \(1989\)](#) así:

$$A_1 = \frac{1}{2} (M_{xx} - M_{yy}) \cos(2az) + M_{xy} \sin(2az) \quad (11)$$

$$A_2 = M_{xx} \cos(az) + M_{yy} \sin(az) \quad (12)$$

$$A_3 = -\frac{1}{2} (M_{xx} + M_{yy}) \quad (13)$$

$$A_4 = \frac{1}{2} (M_{xx} - M_{yy}) \sin(2az) - M_{xy} \cos(2az) \quad (14)$$

$$A_5 = -M_{yz} \cos(az) + M_{xz} \sin(az) \quad (15)$$

donde (M_{ij}, M_{ij}^*) son los elementos del tensor de momentos deviatorio y completo, y az es el azimut entre la fuente y el receptor. En estas inversiones, el tensor de momentos fue descompuesto en: el valor escalar del momento sísmico, un tensor de momentos de doble par (DC) y un tensor de momentos de dipolo de vectores lineales compensados. Además, la calidad de las soluciones fue determinada por el grado de ajuste entre los sismogramas sintéticos y observados, el cual fue cuantificado a través de la reducción de varianza (VR):

$$VR = \sum_i w_i \left(\frac{\int [x_i(t) - d_i(t)]^2}{\int d_i^2(t) dt} \right) \quad (16)$$

Donde x son las series de tiempo de las funciones de Green sintéticas, d son los sismogramas observados, w es la ponderación de la distancia epicentral inversa y i es el índice de la estación. La sumatoria fue realizada para todos los componentes y estaciones. Para el caso de los sismos que tienen soluciones del tensor de momentos telesísmicas del GCMT (Global Centroid Moment Tensor), se usó el ángulo de Kagan (ϕ_i) para comparar la similitud entre dos soluciones del tensor de momentos, el cual se define de la siguiente manera:

$$\phi_i = \arccos \left[\frac{1}{2} (t' \cdot t'' + p' \cdot p'' + b' \cdot b'' - 1) \right] \quad (17)$$

donde t, b, p son los vectores propios de los tensor de momentos. En este estudio, nosotros usamos el código de inversión en el dominio del tiempo (TDMT_INVC_ISO) desarrollado por Douglas Dreger del laboratorio sismológico de Berkeley (Dreger, 2002, 2011). Se probó los dos modos de inversión, deviatoria y completa para cada sismo.

Como parte de la metodología, se realizó una retícula de búsqueda de la profundidad de la fuente, las funciones de Green fueron computadas para cada combinación de evento-estación en una malla discreta usando el método de frecuencia-número de onda (Saikia, 1994), asumiendo un modelo de capas apiladas *half-space* sin variaciones laterales de velocidad (Kubo et al., 2002).

Para esta metodología se asumió el epicentro reportado (Latitud, Longitud) por el servicio

geológico Colombiano (SGC) como la localización espacial para cada evento estudiado. El espaciamiento de la malla es 5, 1, 5 desde 50 a 140 km, 140 a 180 km y entre 180 a 200 km de profundidad, respectivamente. Se calculó un catálogo de funciones de Green usando tres diferentes modelos de velocidad 1-D publicados para: **1.)** localización simultanea de los hipocentros de los sismos e inversión del modelo de velocidades utilizando el programa VELEST (Fandiño, 2020, ver Tabla 1), **2.)** modelo de velocidades IASPEI91 modificado con un espesor de corteza de 50 km (Chang et al., 2019, ver Tabla 2) para ajustarse al espesor promedio de corteza del Norte de los Andes (Poveda et al., 2015), y **3.)** inversión del tiempo de viaje de la onda P realizada con la localización de los hipocentros de los sismos (Ojeda and Havskov, 2001, ver Tabla 3).

Tabla 1

Modelo de Velocidad 1-D de Fandiño.

Interface [km]	Espesor [km]	V_p [km/s]	V_s [km/s]	ρ [km/s]	Q_p	Q_s
0	4	4.61	2.75	2.521	161.979	78.080
4	18	6.54	3.79	2.948	163.880	80.291
22	5	7.24	4.11	3.119	170.983	86.711
27	5	7.27	4.13	3.127	172.576	87.601
32	6	7.61	4.33	3.214	174.021	88.160
38	24	7.84	4.49	3.275	175.574	88.441
62	43	7.85	4.5	3.277	180.143	86.354
105	<i>Half-space</i>	8.0	4.61	3.317	184.483	78.610

Los rangos del filtro pasabandas son un parámetro importante para este estudio, se siguió las recomendaciones de las frecuencias de esquina para dichos sismos (Fukuyama and Dreger,

2000) pero algunas veces usamos un rango más estrecho con frecuencias de esquina desde 0.018 Hz a 0.05 Hz para los eventos en el área con mayor complejidad estructural.

Tabla 2

Modelo de velocidad 1-D IASPEI91 modificado.

Interface [km]	Espesor [km]	V_p [km/s]	V_s [km/s]	ρ [km/s]	Q_p	Q_s
0	5	4.6	2.743	2.548	161.979	78.080
5	20	5.8	3.36	2.72	164.336	80.795
25	15	6.5	3.75	2.92	171.957	87.286
40	10	8.04	4.47	3.32	176.051	88.448
50	55	8.043	4.478	3.34	178.154	87.930
105	20	8.047	4.493	3.358	184.483	78.610
125	20	8.05	4.5	3.371	186.245	77.861
145	10	8.078	4.502	3.375	188.706	81.712
155	10	8.105	4.504	3.382	190.394	85.993
165	10	8.133	4.506	3.389	192.492	92.179
175	10	8.161	4.508	3.395	195.076	100.524
185	10	8.189	4.510	3.400	198.225	111.278
195	10	8.217	4.512	3.405	202.017	124.695
205	<i>Half-space</i>	8.244	4.514	3.410	206.531	141.025

Los sismogramas registrados por RSNC fueron usados para invertir 30 sismos con $4.0 < M < 7.5$ entre 2009 a 2020. A menudo cada evento fue registrado por más de **6 de estaciones banda ancha para los años 2009 a 2012**, y más de **15 estaciones** banda ancha después **del año 2014**. Sin embargo, solo fueron utilizadas para el proceso de inversión estaciones cuyas distancias epicentrales a dichos sismos sean menores a 650 km. La mayoría de las estaciones banda ancha registran 100 muestras por segundo (sps) en las tres componentes (W-E, N-S, Z). Para el pre-

procesado, se eliminó la tendencia lineal, el promedio del offset y finalmente la respuesta instrumental para convertir de conteos digitales a cm/s. Luego se aplicó un *taper* al sismograma, añadiendo ceros antes y después del sismograma de cada sismo para suavizar los efectos del filtro en los bordes de los sismogramas, rotando las componentes horizontales hacia los componentes radiales, tangenciales e integrando para pasar de unidades de velocidad a unidades de desplazamiento. Después ambos sismogramas, sintético y observado fueron filtrados usando un pasabandas tipo Butterworth de 4 polos para las frecuencias de esquina seleccionadas. Finalmente, se re-muestreó los sismogramas observados a un valor de 1 muestra por segundo.

Tabla 3.

Modelo de velocidad 1-D de Ojeda.

Interface [km]	Espesor [km]	V_p [km/s]	V_s [km/s]	ρ [km/s]	Q_p	Q_s
0	4	4.8	2.881	2.561	161.979	78.080
4	21	6.6	3.816	2.962	163.880	80.291
25	7	7.0	3.998	3.059	171.957	87.286
32	8	8.0	4.613	3.317	174.021	88.160
40	60	8.1	4.698	3.344	176.051	88.448
100	<i>Half-space</i>	8.2	4.78	3.371	184.079	79.280

3. Resultados

Los resultados de las soluciones del tensor de momentos pueden ser sensibles a los modelos de velocidad 1-D. Se ejecutaron inversiones del tensor de momentos con los tres modelos de velocidad 1-D seleccionados para cada sismo realizando la retícula de búsqueda de la profundidad focal para examinar cual modelo puede obtener soluciones bien definidas y encontrar la

profundidad que arroja el mejor ajuste entre los sismogramas sintético y observado (El mayor valor de reducción de varianza). Se probaron diferentes combinaciones de configuración de estaciones con el objetivo de estabilizar las inversiones y con los diferentes modos de inversiones (deviatoria y completa). Se descubrió que en algunos casos el desempeño de cada modelo de velocidad 1-D es dependiente en la combinación de estaciones usadas en las inversiones, algunas veces genera degradación en el ajuste entre los sismogramas. Esto puede ser atribuido a la variación de los espesores de la corteza de 30 km en el área cerca a las costas de los océanos Pacífico y Caribe hasta 60 km en las zonas debajo de las cordilleras central y Oriental (Poveda et al., 2015) y el escenario tectónico complejo del Norte de los Andes.

El modelo de velocidad 1-D de Ojeda (Ojeda and Havskov, 2001) muestra un mejor desempeño con estaciones localizados al suroeste de las cordilleras Occidental y Central, el modelo de velocidad 1-D IASPEI91 modificado (Chang et al., 2019) tiene un mejor desempeño con estaciones desplegadas en las cordilleras Central y Oriental, y el modelo de velocidad 1-D de Fandiño (Fandiño, 2020) trabaja mejor con las estaciones localizadas en la parte central de la cordillera Oriental. Finalmente, se encontró que el modelo de velocidad 1-D IASPEI91 modificado (Chang et al., 2019) tiene el mejor rendimiento en las inversiones del tensor de momentos, siendo el modelo con las mejores soluciones definidas para la mitad de los sismos analizados. Para cada inversión, se usó el mismo modelo de velocidad 1-D para todas las estaciones.

Posteriormente, se aplicó un test de Fisher (Test F) considerando un intervalo de confianza de 95% para examinar si existe un mejoramiento significativamente estadístico del ajuste de los sismogramas cuando se incrementa el espacio del modelo de una inversión del tensor de momentos

deviatoria a completa. La adición del componente isotrópico en las inversiones del tensor de momentos no mejora significativamente el ajuste de los sismogramas de los eventos del nido sísmico de Bucaramanga. Así, no hay indicios claros de componentes isotrópicos en dichos eventos.

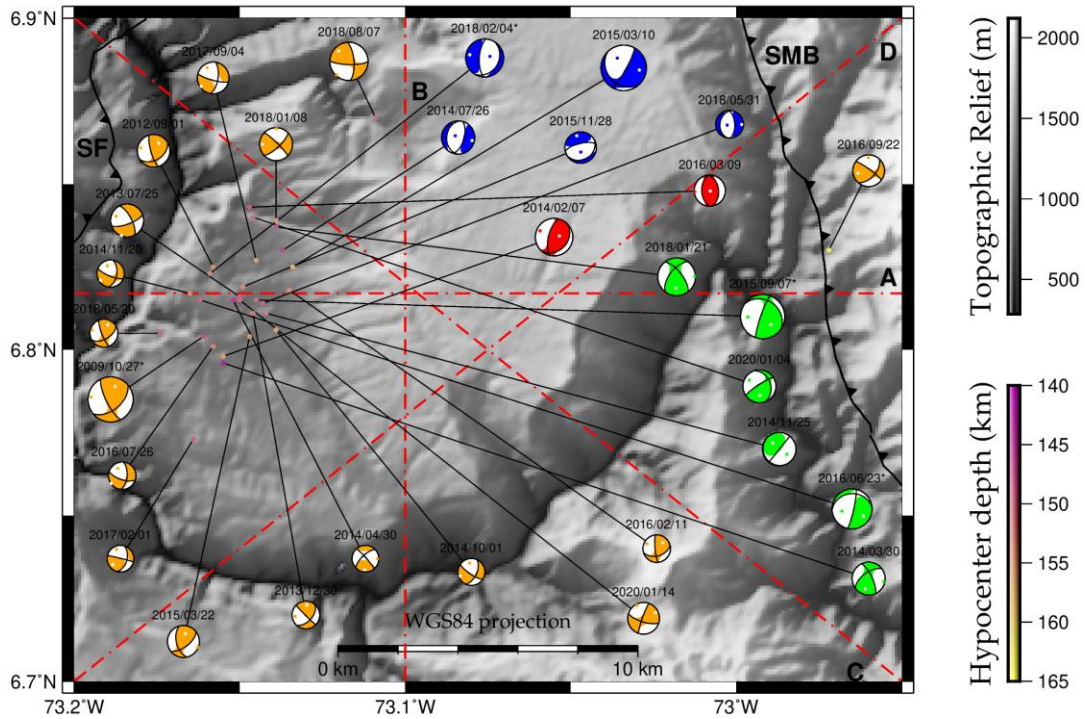
4.1 Mecanismos Focales

Se descubrió una diversidad de mecanismos focales en el nido, compuestos de la siguiente manera: cinco (5) mecanismos focales normales, seis (6) mecanismos focales oblicuos, dos (2) mecanismos focales inversos, y diecisiete (17) mecanismos focales strike-slip (rumbo-deslizantes). La mayoría de los sismos estudiados están concentrados en un área pequeña (menor a 36 km²) en la parte occidental de la Mesa de Los Santos (ver Figura 2). Además, la mayoría de los eventos tienen al menos uno de los planos nodales orientado en dirección nororiente (NE).

Se graficó las orientaciones de los ejes de cada mecanismo focal, con P , B , T siendo las direcciones σ_1 , σ_2 y σ_3 , respectivamente. Las orientaciones de los ejes B y T cambian dramáticamente, pero una clara tendencia de los ejes T buzando hacia el sureste (SE). Para los ejes de P , estos están orientados principalmente en tres direcciones: NW-SE, WNW-SE y N-S (ver Figura 3) y buzan predominantemente hacia el oeste (W), lo cual está en concordancia las direcciones de convergencia de las placas Caribe y Nazca reportado en trabajos previos (Frohlich et al., 1995; Cortes and Angelier, 2005).

Figura 2.

Vista en planta de las soluciones del tensor de momentos de los eventos del nido sísmico de Bucaramanga.



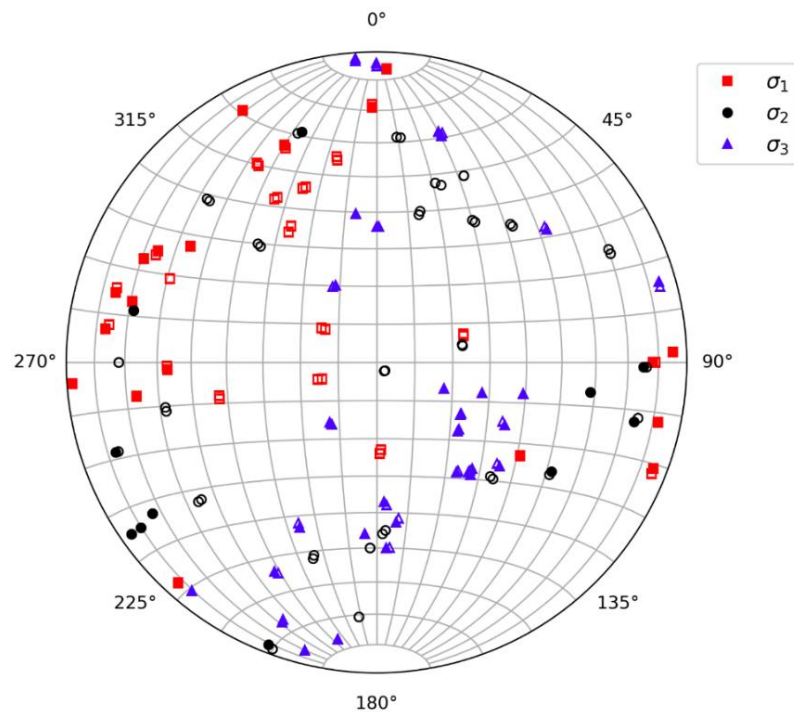
Nota. * en los nombres de los sismos señalan las soluciones menos robustas, **SMB** es el sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta, **SF** indica la localización de la falla del Rio Suarez. Los epicentros están coloreados según la escala de profundidad de la fuente. Los colores en el balón de playa indican el tipo de mecanismo focal, azul indica un mecanismo de tipo normal, rojo es un mecanismo de tipo inverso o de cabalgamiento, verde indica un mecanismo de tipo oblicuo y naranja es un mecanismo de tipo strike-slip.

La mayoría de las soluciones del tensor de momentos tienen al menos 20% de componente CLVD. Al analizar la distribución de la componente CLVD en función de la profundidad de los centroides de los eventos estudiados, se visualiza que los eventos cuyo centroide se localiza entre

120 a 160 km de profundidad, el porcentaje CLVD (componente de dipolo de vectores lineales compensados) toma un amplio rango entre 3% hasta 66%, sin embargo, los eventos cuyo centroide se ubica entre 160 a 200 km, la componente CLVD muestra un incremento con la profundidad en la parte baja del nido de Bucaramanga (ver Figura 4).

Figura 3.

Grafica de las orientaciones de los ejes P, T y B de los mecanismos focales correspondientes a los sismos analizados.

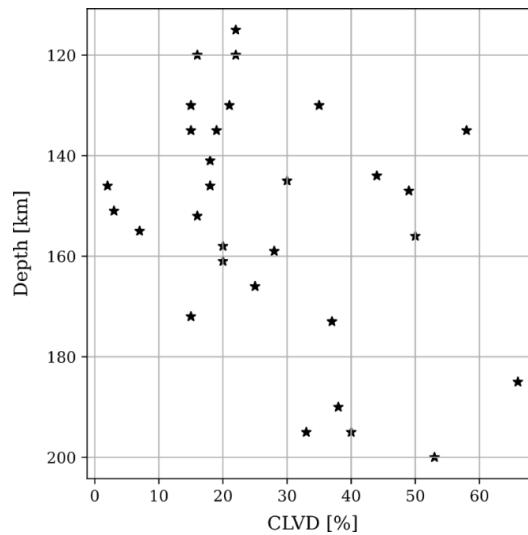


Con el objetivo de analizar el comportamiento de la distribución y orientaciones preferenciales de los mecanismos focales en función de la profundidad y en direcciones ortogonales y paralelas a la convergencia de las placas Nazca y Caribe se propusieron cuatro

secciones cruzadas verticales en direcciones E-W (Este-Oeste), S-N (Sur-Norte), NW-SE (Noroeste-Sureste) y SW-NE (Suroeste-Noreste) respectivamente.

Figura 4.

Gráfica del porcentaje de componente CLVD en función de la profundidad del centroide.

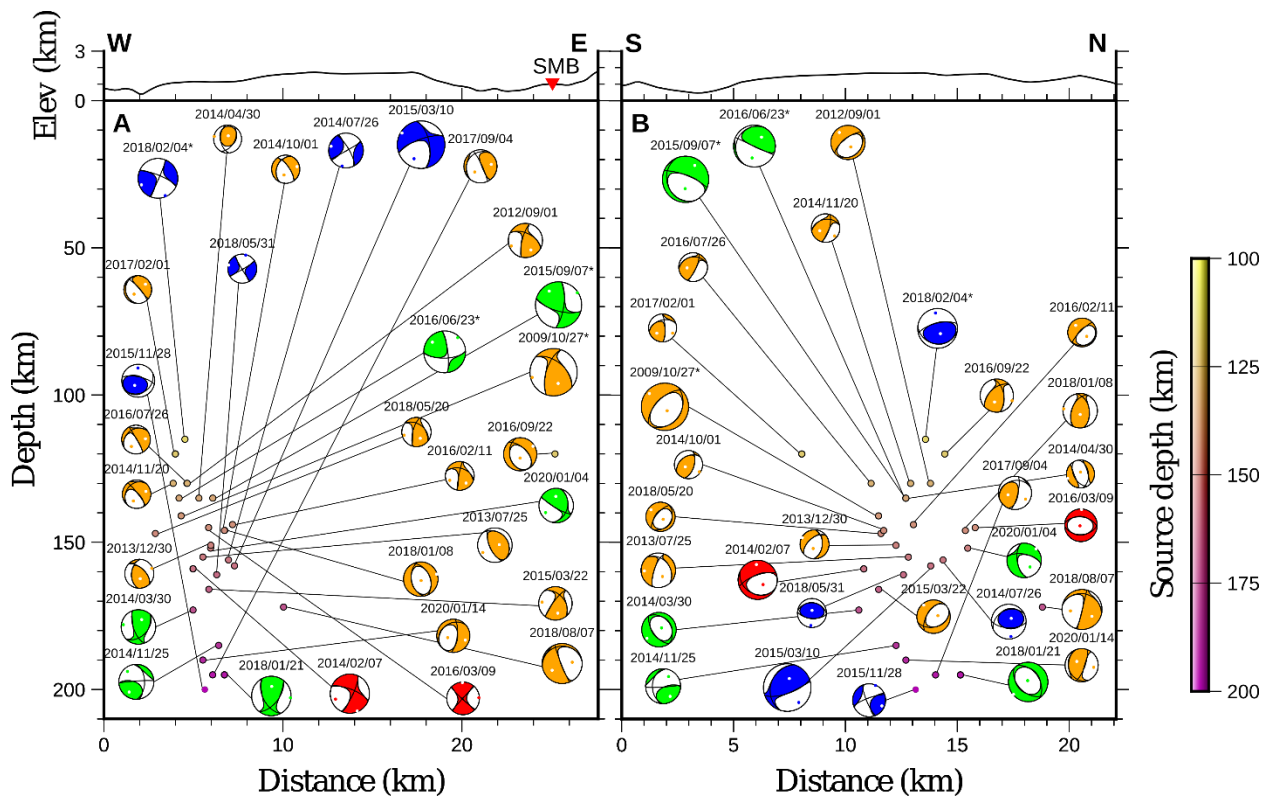


Las secciones cruzadas elaboradas en función de la profundidad del centroide (ver Figuras 5, 6) ilustran una clara variación de los mecanismos focales en función de la profundidad, entre 120 a 150 km de profundidad, los mecanismos focales son principalmente strike-slip, desde 150 a 160 km de profundidad, existe una zona de transición de mecanismos strike-slip a mecanismos preferencialmente dip-slip. Los mecanismos focales inversos o de cabalgamiento están localizados en la parte media-baja (140 a 160 km de profundidad) del nido sísmico de Bucaramanga, los mecanismos normales están principalmente localizados en el techo del nido sísmico (120 a 150 km de profundidad), aunque hay mecanismos normales en la parte baja del nido. Adicionalmente,

los cortes verticales revelan la existencia de una zona de Benioff alineando en dirección NW-SE, donde los eventos invertidos muestran una zona más delgada (ver Figura 6).

Figura 5.

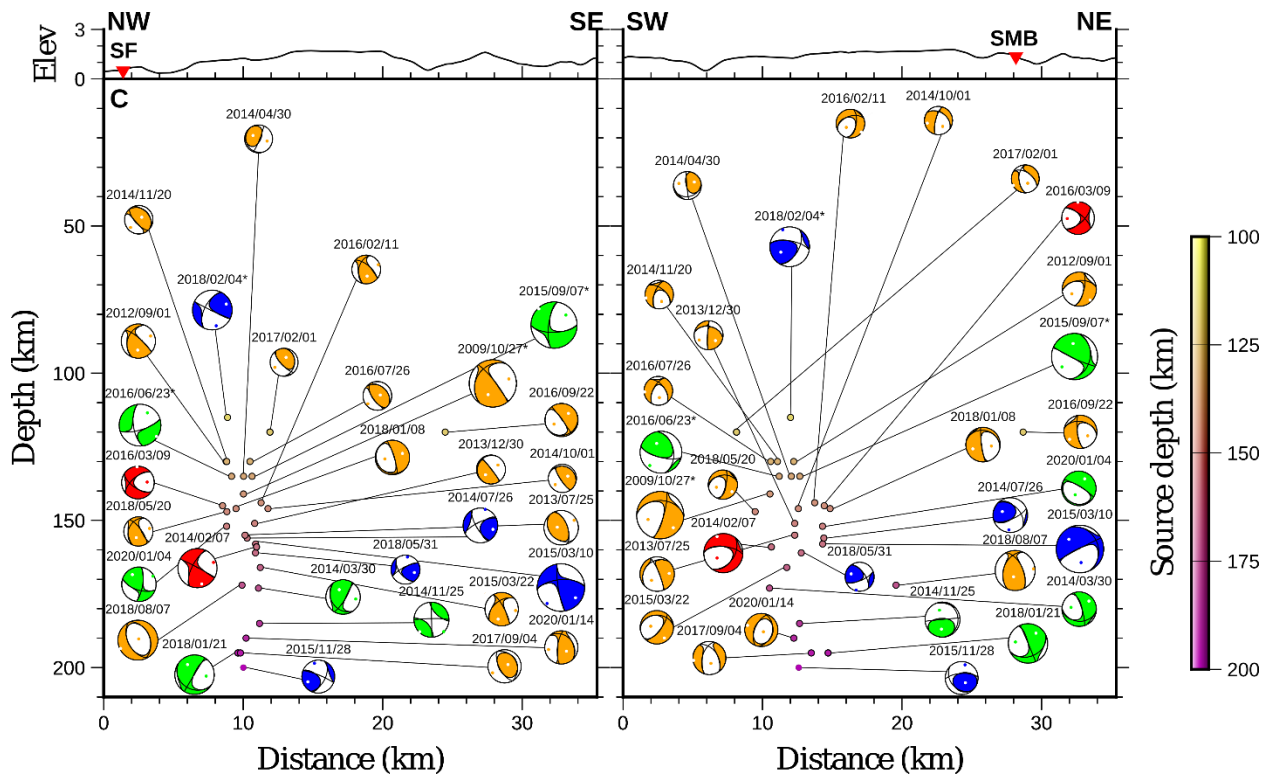
Secciones cruzadas verticales en dirección occidente-orientado (izquierda) y sur-norte (derecha) de los mecanismos focales obtenidos para los sismos analizados del nido sísmico de Bucaramanga en función de la profundidad del centroide.



Nota. El radio de la esfera focal es proporcional a la magnitud de momento (M_w) de cada evento. Los cuadrantes compresionales están coloreados con la escala de colores de la profundidad focal. Azul indica un mecanismo normal, verde es un mecanismo oblicuo, rojo es un mecanismo inverso o de cabalgamiento y naranja indica un mecanismo strike-slip. * en los nombres de los sismos señalan las soluciones menos robustas.

Figura 6.

Secciones cruzadas verticales en dirección noroccidente-suroriente (izquierda) y suroccidente-nororiente (derecha) de los mecanismos focales obtenidos para los sismos analizados del nido sísmico de Bucaramanga en función de la profundidad del centroide.



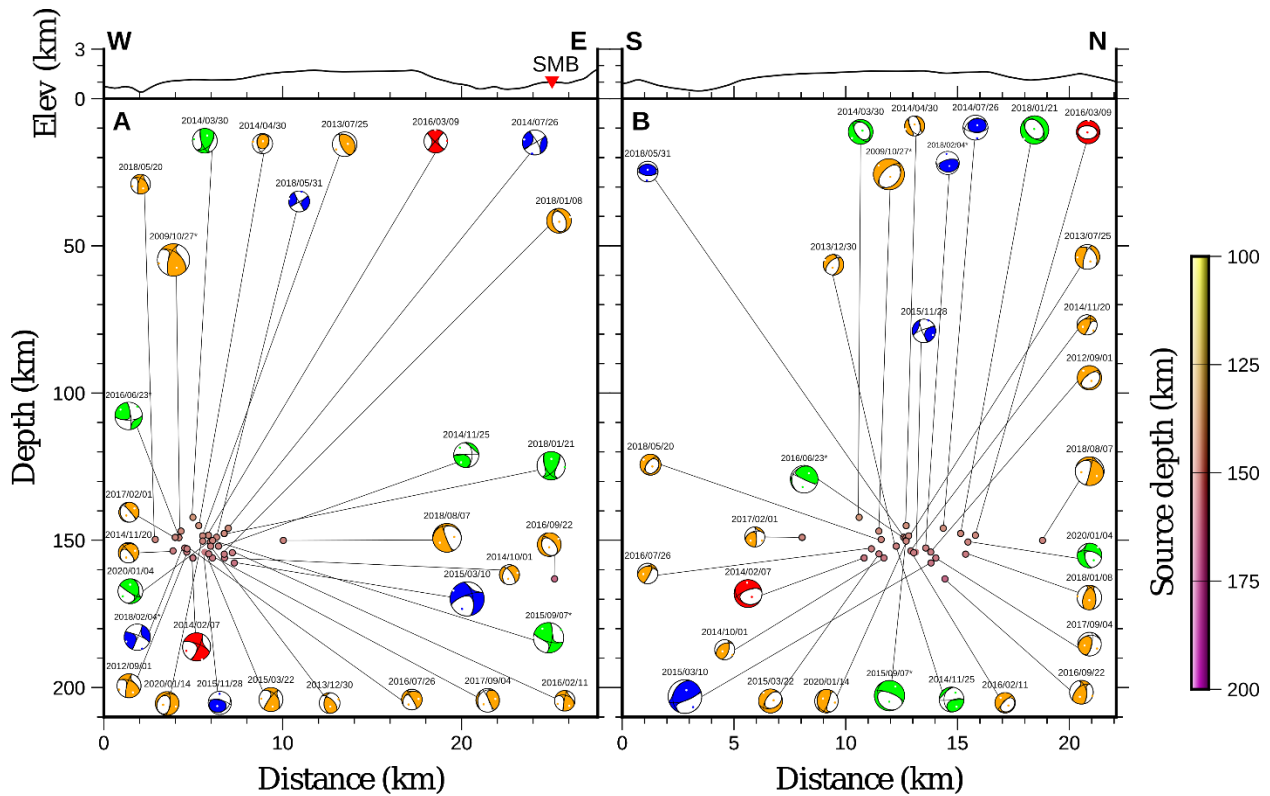
Nota. El radio de la esfera focal es proporcional a la magnitud de momento (M_w) de cada evento. Los cuadrantes compresionales están coloreados con la escala de colores de la profundidad focal. Azul indica un mecanismo normal, verde es un mecanismo oblicuo, rojo es un mecanismo inverso o de cabalgamiento y naranja indica un mecanismo strike-slip. * en los nombres de los sismos señalan las soluciones menos robustas.

En cambio, las secciones cruzadas elaboradas en función de la profundidad hipocentral (ver Figuras 7, 8), aunque ilustran una clara variación de los mecanismos focales en función de la

profundidad y en la sección NW-SE se visualiza la parte más delgada del nido de Bucaramanga sugiriendo la posible existencia de una zona de Benioff alineada en esta dirección (ver Figura 8), no se evidencia un patrón claro de distribución de los mecanismos focales. Al comparar los resultados de las secciones cruzadas en función de las profundidades del hipocentro y del centroide, se puede apreciar una diferencia importante en los rangos de profundidad de los hipocentros y centroides en alguno de los eventos estudiados.

Figura 7.

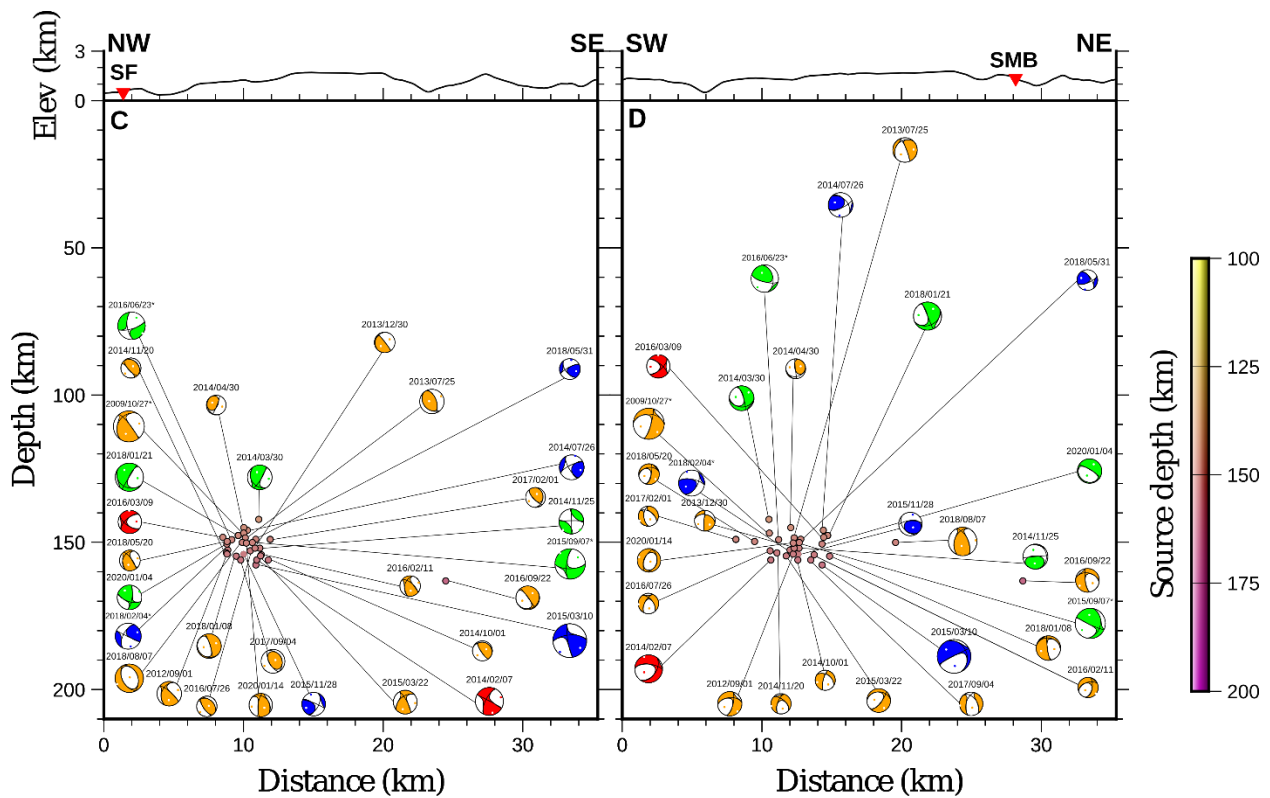
Secciones cruzadas verticales en dirección occidente-orientada (izquierda) y sur-norte (derecha) de los mecanismos focales obtenidos para los sismos analizados del nido sísmico de Bucaramanga en función de la profundidad hipocentral.



Nota. El radio de la esfera focal es proporcional a la magnitud de momento (M_w) de cada evento. Los cuadrantes compresionales están coloreados con la escala de colores de la profundidad focal. Azul indica un mecanismo normal, verde es un mecanismo oblicuo, rojo es un mecanismo inverso o de cabalgamiento y naranja indica un mecanismo strike-slip. * en los nombres de los sismos señalan las soluciones menos robustas.

Figura 8.

Secciones cruzadas verticales en dirección noroccidente-suroriente (izquierda) y suroccidente-nororiente (derecha) de los mecanismos focales obtenidos para los sismos analizados del nido sísmico de Bucaramanga en función de la profundidad hipocentral.



Nota. El radio de la esfera focal es proporcional a la magnitud de momento (M_w) de cada evento. Los cuadrantes compresionales están coloreados con la escala de colores de la profundidad focal.

Azul indica un mecanismo normal, verde es un mecanismo oblicuo, rojo es un mecanismo inverso o de cabalgamiento y naranja indica un mecanismo strike-slip. * en los nombres de los sismos señalan las soluciones menos robustas.

4.2 Comparación de las soluciones con los catálogos del GCMT y SGC

Se compararon las soluciones con las disponibles en el catálogo de soluciones del tensor de momento del Global Centroid Moment Tensor (GCMT) usando sismogramas telesísmicos y el catálogo del tensor de momentos del servicio Geológico Colombiano (SGC). Para el caso del catálogo del GCMT, se evidenció que los valores de los ángulos de Kagan son predominantemente menores a 30° , excepto para un sismo que tiene un valor cercano a 50° , adicionalmente, se descubrió que los sismos con centroides localizados por debajo de los 140 km de profundidad, presentan altos valores de ángulo de Kagan (ver [Figura 9](#)).

Por el contrario, en el caso del catálogo del SGC, se descubrió que el 43% de los eventos comunes tienen ángulos de Kagan mayores a 40° , especialmente para los sismos de magnitud baja a altas profundidades (ver [Figura 10](#)).

Figura 9.

Gráfico de los valores calculados del ángulo de Kagan para los eventos comunes entre el catálogo del GCMT vs la magnitud M_w y la profundidad de los centroides obtenidos en este estudio.

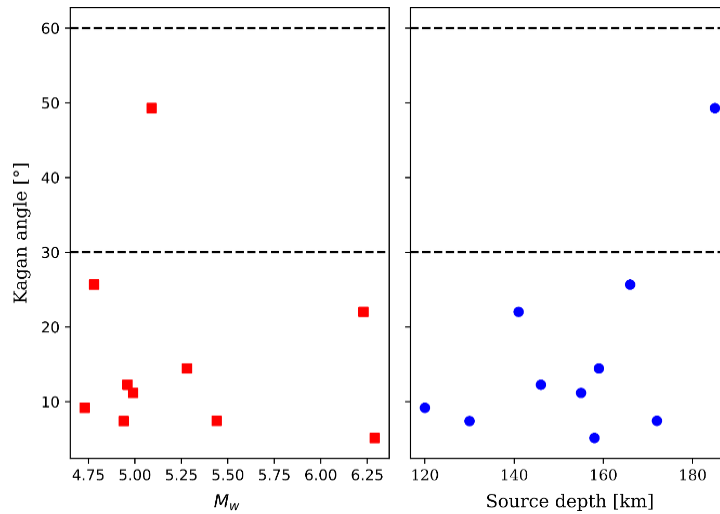
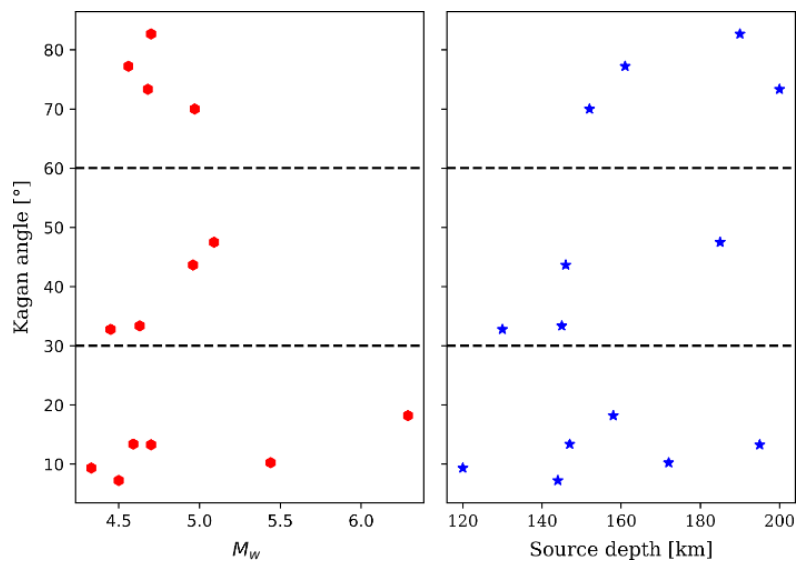


Figura 10.

Gráfico de los valores calculados del ángulo de Kagan para los eventos comunes entre el catálogo del SGC vs la magnitud M_w y la profundidad de los centroides obtenidos en este estudio.



Para comprobar si las magnitudes de momento (M_w) son estables, comparamos nuestros resultados con los reportados por los catálogos del GCMT y SGC. Se encontró que para los sismos con magnitudes con $M_w > 4.7$, las M_w derivadas por el estudio son consistentes con las reportadas con el catalogo GCMT (ver Figura 11). En cambio, para la comparación con los catálogos SGC, las magnitudes derivadas tienden a ser subestimadas para sismos con $M_w > 4.8$; por otro lado, los eventos con magnitudes (M_w) inferiores a 4.8, en una proporción de 2 a 1, las magnitudes obtenidas tienden a ser subestimadas en lugar de ser sobreestimadas (ver Figura 12). Además, se evidencia en la comparación del momento sísmico (M_0) entre este estudio y los catálogos del SGC y GCMT, una fuerte correlación lineal. El momento sísmico tiende a estar en los mismos ordenes de magnitud para ambos casos, aunque algunos sismos tengan mecanismos focales diferentes (ver Figura 13). Estos resultados demuestran que nuestras soluciones del tensor de momentos son más consistentes con las soluciones reportadas por el catálogo GCMT (ver Figura 14).

Figura 11.

Comparación de las magnitudes de momento (M_w) reportadas por el catálogo del GCMT y los resultados obtenidos en este estudio.

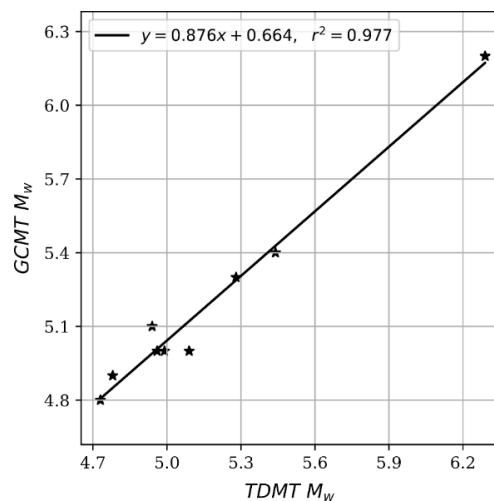


Figura 12.

Comparación de las magnitudes de momento (M_w) reportadas por el catálogo del SGC y los resultados obtenidos en este estudio.

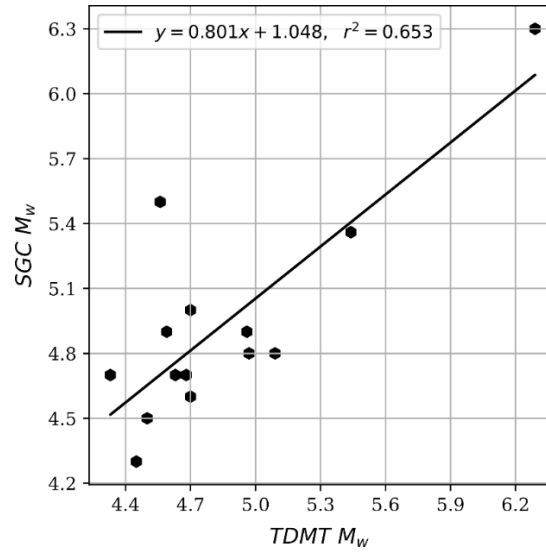


Figura 13.

Comparación del momento sísmico (M_o) para los eventos comunes entre los catálogos del SGC (Izquierda) y GCMT (derecha) con los resultados obtenidos en este estudio.

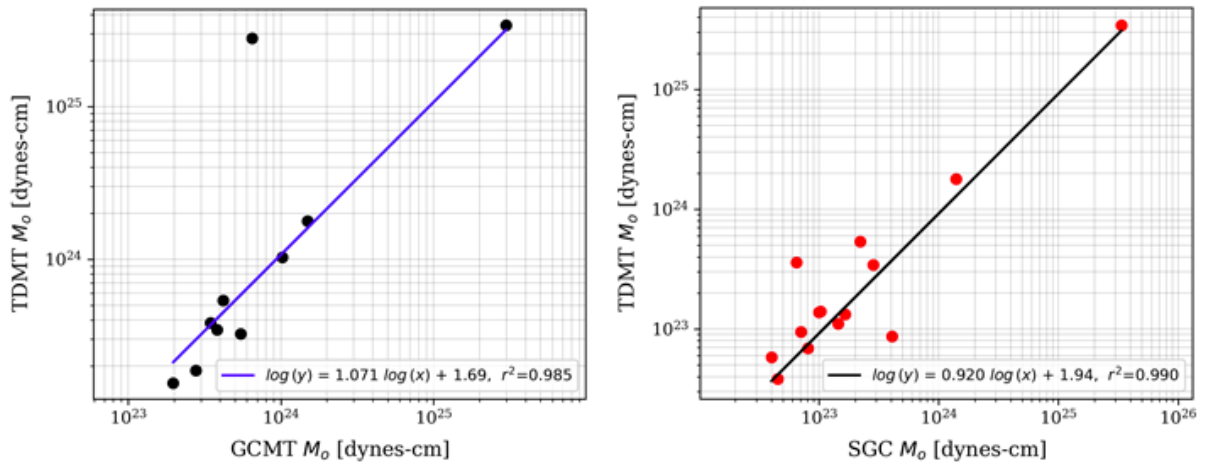
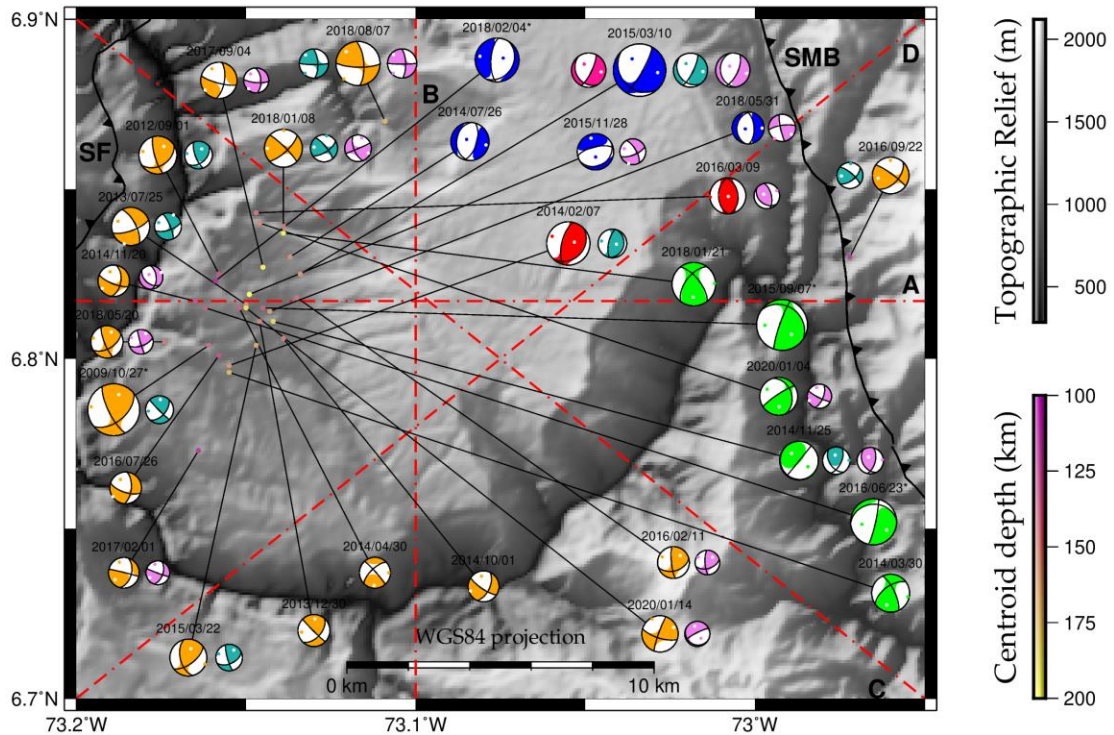


Figura 14.

Vista en planta mostrando la comparación de las soluciones del tensor de momentos obtenidas en este estudio con las soluciones reportadas por los catálogos del GCMT, SGC y otros estudios.



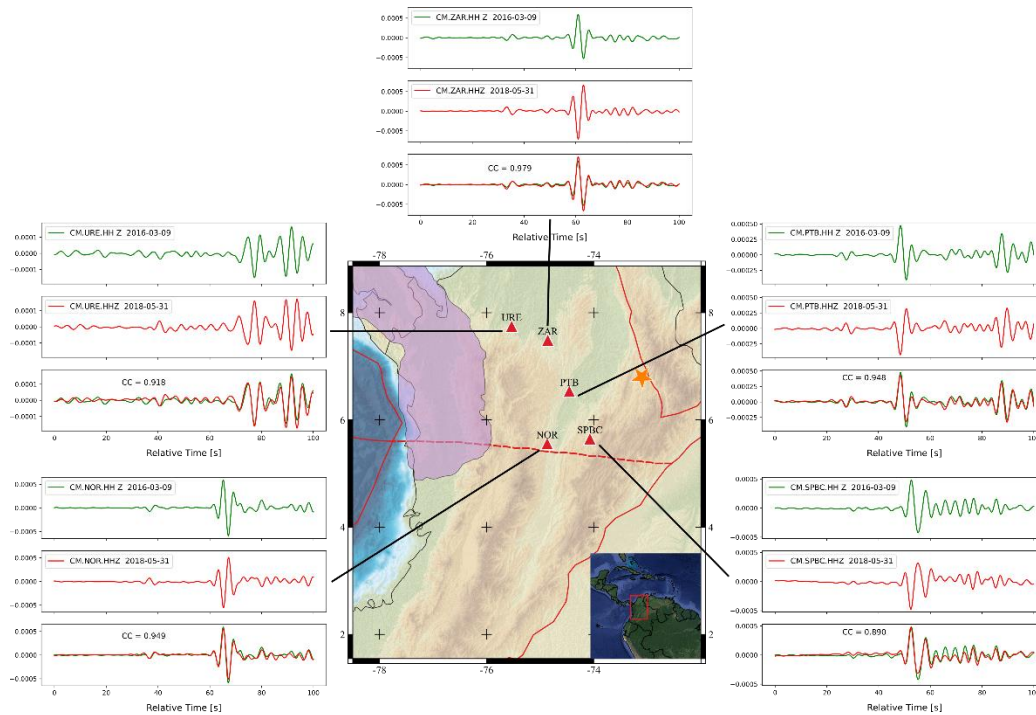
Nota. * en los nombres de los sismos señalan las soluciones menos robustas, **SMB** es el sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta, **SF** indica la localización de la falla del Rio Suarez. Los mecanismos focales de color verde aguamarina indican las soluciones reportadas por el catalogo del GCMT, los mecanismos focales de color púrpura pertenecen a las soluciones reportadas por el catalogo del SGC y el mecanismo focal de color rosado oscuro pertenece a la solución reportada por el trabajo de Poli et al. (2016). Los epicentros están coloreados según la escala de profundidad de la fuente. Azul indica un mecanismo normal, verde es un mecanismo oblicuo, rojo es un mecanismo inverso o de cabalgamiento y naranja indica un mecanismo strike-slip. * en los nombres de los sismos señalan las soluciones menos robustas.

4.3 Polaridad invertida

Con base en los descubrimientos reportados en el trabajo de Prieto et al., 2012, se realizó una búsqueda sistemática de polaridad invertida en sismos que tienen mecanismos focales opuestos. Se utilizaron los sismogramas banda ancha registrados de la RSNC que fueron procesados obteniendo dichos sismogramas con unidades físicas de desplazamiento/deformación del suelo (cm). Se tomaron los primeros 100 segundos del sismograma desde del tiempo de origen de cada evento. Los resultados de la búsqueda arrojaron que se encontró un par de sismos con mecanismos focales opuestos que presentan sismogramas similares con la polaridad invertida (coeficiente de correlación $|CC| > 0.89$) al menos en cinco (5) estaciones sismológicas (ver Figura 15). El primero corresponde al sismo del 09/03/2016 que tiene un mecanismo focal de tipo inverso o de cabalgamiento y el otro es el sismo del 31/05/2018 con un mecanismo focal de tipo normal (ver Figura 14).

Figura 15.

Sismogramas de polaridad normal e invertida para los sismos del 09/03/2016 y 31/05/2018 con mecanismos focales de tipo inverso y normal respectivamente.



Nota. Registros en al menos cinco (5) estaciones que presentan sismogramas similares de la componente vertical ($CC > 0.89$) para los sismos del 09/03/2016 (sismogramas de color verde) y 31/05/2018 (sismograma de color rojo) con mecanismo inverso y normal respectivamente del nido sísmico de Bucaramanga (estrella naranja). En cada panel se presentan los sismogramas en el siguiente orden, primero el sismograma del evento del 09/03/2016 (color verde) con polaridad normal, debajo el sismograma del evento del 31/05/2018 (color rojo) que tiene polaridad invertida. El último panel representa el stack de los sismogramas de polaridades normal e invertida (Cabe resaltar que el sismograma rojo ha sido invertido con el propósito de comparar). En el mapa las líneas rojas indican los márgenes tectónicos y la línea punteada roja indica la ubicación del propuesto Caldas Tear.

4. Discusión

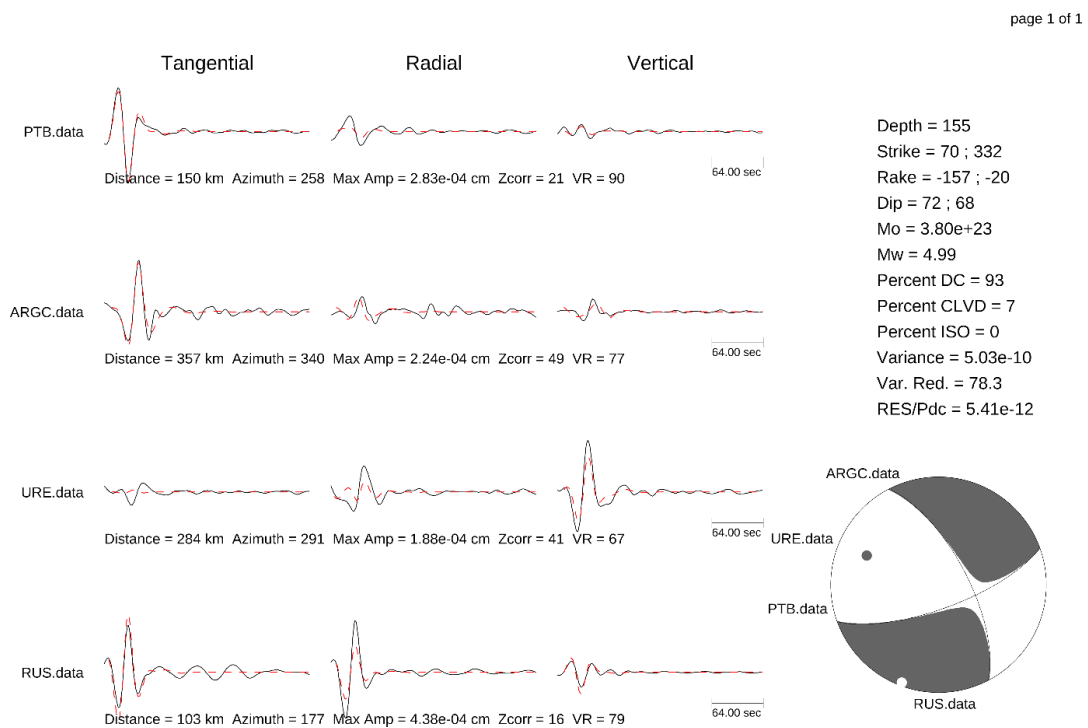
En el nido sísmico de Bucaramanga, los 30 mecanismos focales obtenidos muestran diferentes estilos de falla distribuidos en un volumen pequeño, en los cuales se evidencia un porcentaje significativo de componente CLVD, siendo concordante con lo reportado en estudios previos (Schneider et al., 1987; Frohlich, 2006; Zarifi et al., 2007; Frohlich and Nakamura, 2009; Prieto et al., 2012). Además, se encontró que las variaciones de los mecanismos focales de los sismos cambian en función de la profundidad y horizontalmente. Usualmente, uno de los planos nodales está orientado hacia el noreste (NE). La variedad de los mecanismos focales está bien delimitada por los sismogramas registrados (ver Figuras 16, 17, 18), siendo el tipo strike-slip mecanismo focal más recurrente. Los patrones de orientación de los ejes de compresión (P) son consistentes con las direcciones de convergencia de las placas Nazca y Caribe, revelando que los movimientos relativos de dichas placas son aún el proceso dominante para su ocurrencia.

Los componentes CLVD de los sismos ilustran un incremento en dicha componente en los sismos con **centroides ubicados** a profundidades mayores a 160 km que pueden alcanzar hasta un 65% (ver Figura 4), **aunque es de resaltar que se tiene cierta incertidumbre en la profundidad de los centroides**. La componente CLVD esta usualmente asociada a **los siguientes factores**: actividad volcánica (Aki, 1979), complejidad en la fuente de los sismos (Kikuchi and Kanamori, 1991; Kikuchi et al., 1993), datos con mucha presencia de ruido y/o efectos de propagación de onda tridimensionales 3D despreciados (Vavryčuk, 2015), **cizallamiento en fallas irregulares** (Sipkin, 1986; Frohlich, 1994; Zahradník et al. 2008), **superposición de algunos sub-eventos con diferentes**

mecanismos de doble par (Kuge and Kawakatsu, 1990; Frohlich et al., 1995; Tibi et al. 2001) y fracturamiento compresional o tensional de la falla (Vavryčuk et al. 2021).

Figura 16.

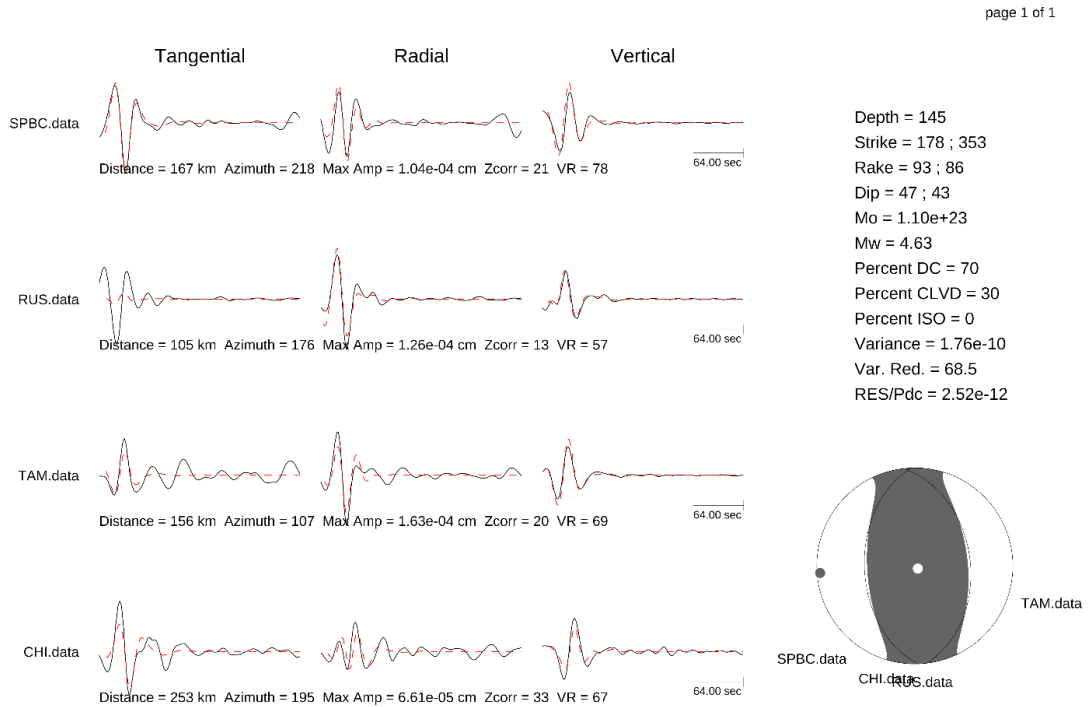
Ejemplo de un ajuste de sismogramas para un mecanismo focal de tipo strike-slip del sismo 2013/07/25.



Nota. El modelo de velocidad 1-D con el mejor rendimiento fue el de Ojeda. Las líneas rojas indican las funciones de Green calculadas y las líneas negras indican los sismogramas registrados y procesados para cada estación utilizada en la inversión.

Figura 17.

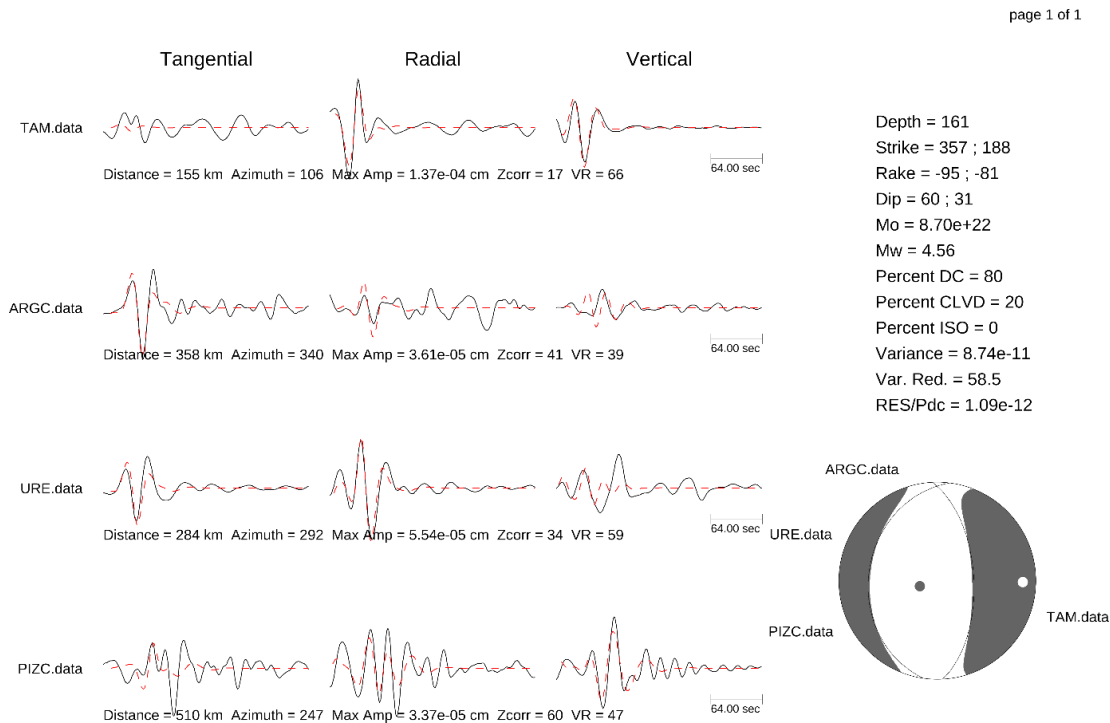
Ejemplo de un ajuste de sismogramas para un mecanismo focal de tipo inverso del sismo 2016/03/09.



Nota. El modelo de velocidad 1-D con el mejor rendimiento fue el IASPEI91 modificado. Las líneas rojas indican las funciones de Green calculadas y las líneas negras indican los sismogramas registrados y procesados para cada estación utilizada en la inversión.

Figura 18.

Ejemplo de un ajuste de sismogramas para un mecanismo focal de tipo normal del sismo 2018/05/31.



Nota. El modelo de velocidad 1-D con el mejor rendimiento fue el IASPEI91 modificado. Las líneas rojas indican las funciones de Green calculadas y las líneas negras indican los sismogramas registrados y procesados para cada estación utilizada en la inversión.

Aunque no se ha observado actividad volcánica en superficie en el área del nido, estudios previos registran que el vulcanismo en la cordillera Oriental puede estar inactivo, pero no extinto (Bernet et al., 2016; Poveda et al., 2018), concentrado en el complejo Paipa-Iza (Pardo et al., 2005), localizado a una distancia cercana aproximada de 150 km del nido sísmico de Bucaramanga. También los trabajos de Van der Hilst and Mann (1994) and Bernal-Olaya et al. (2015) reportaron anomalías de bajas velocidades a profundidades mayores a 80 km cerca y debajo del nido sísmico

de Bucaramanga, lo cual atribuyen a un fenómeno que involucra fluidos. Estos descubrimientos apoyan la posible existencia de interacción de fluidos a profundidades cercanas al nido sísmico de Bucaramanga. Teniendo en cuenta las ideas previamente expuestas y con los datos obtenidos en este trabajo, se pueden limitar los posibles escenarios que podrían explicar el incremento de la componente CLVD en los sismos con centroides por debajo de los 160 km de profundidad a los siguientes: (1) cizallamiento en fallas irregulares (Sipkin, 1986; Frohlich, 1994; Zahradník et al. 2008), (2) superposición de algunos sub-eventos con diferentes mecanismos de doble par (Kuge and Kawakatsu, 1990; Frolich, 1995; Tibi et al. 2001), (3) Presencia y/o ascenso de fluidos (Schneider et al., 1987; Shih et al., 1991).

Diversos estudios previos han documentado la presencia de sismos repetidos principalmente profundidades someras, regiones volcánicas y unos pocos estudios en altas profundidades e incluso sismos lunares (por ej, Frohlich y Nakamura, 2009). Para el caso de los sismos de profundidad intermedia, aunque ha habido ciertos estudios, el trabajo de Prieto et al., (2012) destaca por ser el primero en realizar una búsqueda sistemática y reportar la presencia de sismos repetidos (repeating earthquakes) con polaridad normal e invertida del movimiento del suelo en el nido sísmico de Bucaramanga utilizando datos locales de la red sismológica nacional de Colombia (RSNC). En este trabajo, se encontró polaridad invertida en los dos sismos con una particularidad de que poseen mecanismos focales opuestos (ver Figura 15), además de que las orientaciones de los planos de falla son muy similares y están separados entre sí a una distancia corta (< 3 km) de acuerdo a la información reportada por el catalogo del SGC. Por ende, podemos sugerir dos posibles interpretaciones de acuerdo con la ubicación de los hipocentros; (1) los sismos con polaridades invertidas se encuentran localizados en fallas subparalelas que tienen cinemáticas

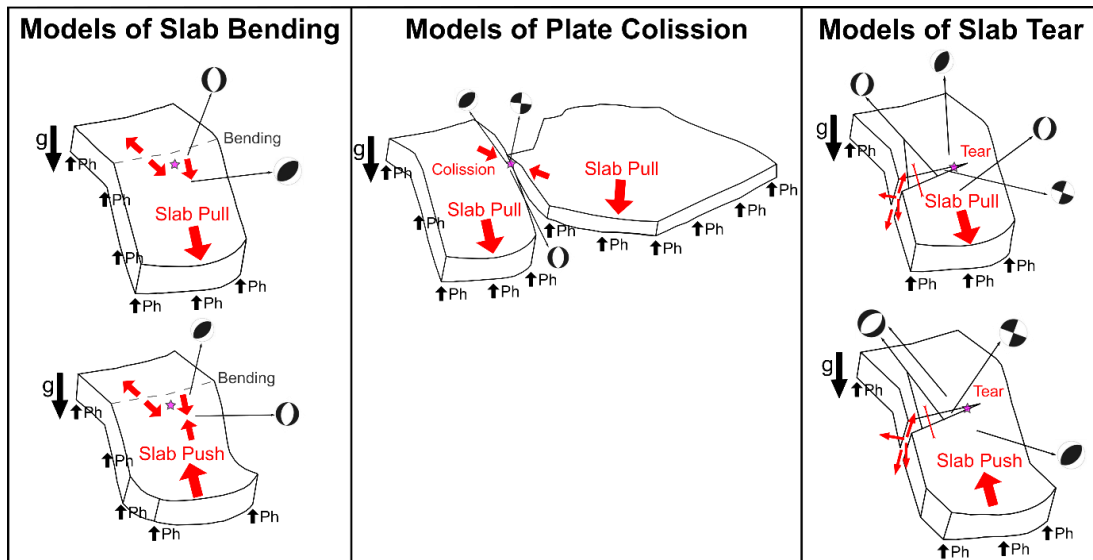
contrarias con respecto a los sismos con polaridad normal que sigue la misma línea propuesta por Prieto et al., (2012), y (2) los sismos con polaridades invertidas se encuentran localizados en la misma falla, en diferentes tramos que tienen cinemáticas opuestas. Debido a la incertidumbre en la localización de los sismos y la baja cantidad de muestras encontradas, no podemos por ahora concluir cual hipótesis es la más acertada y aproximada a la realidad de los procesos que están ocurriendo en el nido. Se deben realizar estudios adicionales a fin de disminuir la incertidumbre en la ubicación de los hipocentros de dichos sismos y poder determinar la hipótesis correcta que explica este particular fenómeno característico del nido sísmico de Bucaramanga.

Acerca de los procesos tectónicos responsables para el inusual incremento de la concentración de sismicidad de profundidad intermedia y la variedad de los mecanismos focales encontrados en el nido, escenarios previamente propuestos incluyen: doblamiento de la placa subducida (Sun et al., 2022), propagación de un desgarre en la placa subducida (Cortes and Angelier, 2005; Vargas and Mann, 2013), subducción de una litosfera extraordinariamente hidratada (e.g Chiarabba et al., 2016) y colisión entre las dos placas (Zarifi et al., 2007). Se analizaron los mecanismos focales esperados para estos escenarios (ver Figura 19) y se compararon entre ellos con las soluciones obtenidas en este trabajo de los tensores de momentos. Para el caso de solo el doblamiento de placa, ese escenario es insuficiente para explicar las soluciones obtenidas del tensor de momentos, particularmente la gran proporción de mecanismos strike-slip. Por otro lado, para el proceso de desgarre de placa, se espera que haya más sismos con mecanismos strike-slip y algunos eventos dip-slip. Por lo tanto, nuestros resultados parecen ser más consistentes con el modelo de desgarre de placa. Un aspecto a resaltar, es que la dirección del máximo esfuerzo compresional σ_1 rota en dirección norte-sur (N-S), dicha evidencia indica que

no se puede descartar el escenario puramente de colisión entre placas. Por eso, nuestras soluciones apoyan más el escenario del desgarre de placa con porciones no conocidas de mezcla de doblamiento de la placa y/o colisión de placas, quizá el desgarre activo está permitiendo el doblamiento de placa en el segmento superior de placa. El desgarre de placa y el mecanismo de generación asociado, dehydration embrittlement, es probablemente el principal mecanismo para la generación de los sismos de profundidad intermedia del nido sísmico de Bucaramanga.

Figura 19.

Diagrama esquemático de los mecanismos focales esperados para algunos de los escenarios tectónicos propuestos para el nido sísmico de Bucaramanga y sus alrededores.



Nota. La estrella morada indica la localización del nido sísmico de Bucaramanga, g es la aceleración gravitacional, Ph es la presión hidrostática. Los mecanismos focales añadidos en las explicaciones son dibujados como se observan en vista de planta.

Sin embargo, la deformación compleja visualizada en este estudio no puede excluir la posibilidad del proceso de thermal runaway process propuesto por [John et al., \(2009\)](#) o el liberamiento de los esfuerzos diferenciales acumulados en fuertes rocas secas metaestables ([Scambelluri et al., 2017](#)). Por otra parte, los procesos termales son mayormente solo difusivos y no pueden producir tal deformación heterogénea concentrada observada en este estudio. Parece que las rocas secas metaestables son poco probables de estar presentes en el nido. Debido a la limitación en la magnitud y cantidad de sismos analizados del nido sísmico de Bucaramanga, más estudios necesitan ser desarrollados con el objeto de confirmar o descartar este nuevo escenario tectónico propuesto para el entendimiento de los procesos responsables de la alta sismicidad de profundidad intermedia y diversidad de los mecanismos focales encontrados en el nido sísmico de Bucaramanga.

5. Conclusiones

Este trabajo realizó un estudio de inversión del tensor de momentos de los sismos del nido sísmico de Bucaramanga utilizando datos de la red regional de estaciones banda ancha. Se probaron dos modos de inversión: deviatoria y completa, y luego se usó un test de hipótesis estadístico de Fisher para demostrar que la adición del componente isotrópico en la inversión no mejora significativamente el ajuste de los sismogramas. En consecuencia, es poco probable que estos sismos tienen cambios de volumen asociados durante el proceso de ruptura.

Los resultados de los ángulos de kagan indican que las soluciones obtenidas de los parámetros de fuente y mecanismos focales de los sismos estudiados son más consistentes con las

soluciones reportadas en el catálogo del GCMT (Global Centroid Moment Tensor) que con el catálogo del SGC (Servicio Geológico Colombiano).

Se documentaron una gran diversidad en los mecanismos focales en el nido, algunos dependientes en función de profundidad. Además, nuestras soluciones del tensor de momentos muestran que los cambios en las direcciones de los esfuerzos principales cambian dramáticamente dentro del volumen del nido de 27 km x 15 km x 40 km de profundidad. Se visualiza deformación heterogénea y localizada, no consistente con los procesos que generan perturbación de los esfuerzos en una longitud de onda muy larga (> 100 km).

El análisis de la distribución de los mecanismos focales y los principales ejes de orientación apoyan un nuevo escenario tectónico de un desgarre de placa con una mezcla desconocida de doblamiento y/o colisión de placas para explicar la diversidad de mecanismos focales encontrados y alta sismicidad intermedia concentrada en el nido sísmico de Bucaramanga (e.g [Engdahl and Villasenor, 2002](#); [Cortes and Angelier, 2005](#); [Zarifi et al., 2007](#); [Prieto et al., 2012](#)). Este trabajo también exhibe que una sismicidad única densa probablemente está experimentando una deformación co-sísmica heterogénea muy concentrada, la cual no había sido documentada antes para otros clusters de sismos de profundidad intermedia.

6. Recomendaciones

Investigaciones adicionales son requeridas para comprender mejor las implicaciones de estos resultados, la validez de este nuevo escenario tectónico propuesto, y la física de los mecanismos de ruptura responsables de la sismicidad de profundidad intermedia del nido sísmico de Bucaramanga.

Referencias Bibliográficas

- Aki, K. (1979). Characterization of barriers on an earthquake fault. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 84(B11), 6140–6148.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1029/JB084iB11p06140>
- Bernal-Olaya, R., Mann, P., & Vargas, C. A. (2015). *Earthquake, tomographic, seismic reflection, and gravity evidence for a shallowly dipping subduction zone beneath the Caribbean Margin of Northwestern Colombia*.
- Bernet, M., Urueña, C., Amaya, S., & Peña, M. L. (2016). New thermo and geochronological constraints on the Pliocene-Pleistocene eruption history of the Paipa-Iza volcanic complex, Eastern Cordillera, Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 327, 299–309. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.08.013>
- Burke, K. (1988). Tectonic evolution of the Caribbean. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 16(1), 201–230. <https://doi.org/10.1146/annurev.ea.16.050188.001221>
- Chang, Y., Warren, L. M., Zhu, L., & Prieto, G. A. (2019). Earthquake Focal Mechanisms and Stress Field for the Intermediate-Depth Cauca Cluster, Colombia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(1), 822–836.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2018JB016804>
- Chiarabba, C., De Gori, P., Faccenna, C., Speranza, F., Seccia, D., Dionicio, V., & Prieto, G. A. (2016). Subduction system and flat slab beneath the Eastern Cordillera of Colombia. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17(1), 16–27.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2015GC006048>
- Christeson, G. L., Mann, P., Escalona, A., & Aitken, T. J. (2008). Crustal structure of the

- Caribbean–northeastern South America arc-continent collision zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(B8104). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2007JB005373>
- Cortes, M., & Angelier, J. (2005). Current states of stress in the northern Andes as indicated by focal mechanisms of earthquakes. *Tectonophysics*, 403, 29–58. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.03.020>
- Dreger, D. S. (2002). TDMT_INV: Time Domain Seismic Moment Tensor INVersion. In Lee, W.H.K., Kanamori, H., Jennings, P.C., Kisslinger, C. (Eds.), *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology.: Vol. Part B* (Issue 81, p. 1627). Academic Press.
- Dreger, D. S. (2011). Time-Domain Moment Tensor INVerse Code; Berkeley Seismological Laboratory, Open File Report. *The Geological Society of America Special Paper*, 428, 18. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pepi.2012.04.002>.
- Ekström, G., Nettles, M., & Dziewoński, A. M. (2012). The global CMT project 2004–2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 200–201, 1–9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pepi.2012.04.002>
- Engdahl, E. R., & Villasenor, A. (2002). Global seismicity. H.K., Lee, W.H.K., Jennings, P.C., Kisslinger, C. (Eds.), *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, Part A*, 41, 665–690. [https://doi.org/https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1969\)80\[1639:TOTCAM\]2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1130/0016-7606(1969)80[1639:TOTCAM]2.0.CO;2)
- Fandiño, H. J. (2020). *Geometría de subducción de la placa de Nazca bajo el noroeste de Suramérica, a partir del análisis de microsismicidad reciente*. Universidad Nacional de Colombia.
- Frohlich, C, Kadinsky-cade, K., & Davis, S. D. (1995). A re-examination of the Bucaramanga Colombia, earthquake nest. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85, 1622–1634.

<https://pubs.geoscienceworld.org/ssa/bssa/article-abstract/85/6/1622/102646/A-reexamination-of-the-Bucaramanga-Colombia?redirectedFrom=fulltext>

Frohlich, Cliff. (1994). Earthquakes with Non\&\#x2014;Double-Couple Mechanisms. *Science*, 264(5160), 804–809. <https://doi.org/10.1126/science.264.5160.804>

Frohlich, Cliff. (2006). *Deep Earthquakes*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107297562>

Frohlich, Cliff, & 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* - *PHYS EARTH PLANET INTERIORS*, 173, 365–374. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2009.02.004>

Fukuyama, E., & Dreger, D. (2000). Performance test of an automated moment tensor determination system for the future “Tokai” earthquake. *Earth Planets Space*, 52, 383–392. <https://doi.org/10.1186/BF03352250>

Harvard. (n.d.). *CMT catalogue*. <http://www.seismology.harvard.edu/>.

Herrmann, R. B., & Wang, C. Y. (1985). A comparison of synthetic seismograms. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75, 41–56.

Higgs, R. (2009). Caribbean-South America oblique collision model revised. *Geological Society of London Special Publication*, 328, 613–657.

John, T., Medvedev, S., Rüpke, L. H., Andersen, T. B., Podladchikov, Y. Y., & Austrheim, H. (2009). Generation of intermediate-depth earthquakes by self-localizing thermal runaway. *Nature Geoscience*, 2(2), 137–140.

Jost, M. L., & Herrmann, B. H. (1989). A Student’s Guide to and Review of Moment Tensors. *Seismological Research Letters*, 60, 37–57. <https://doi.org/https://doi:10.1785/gssrl.60.2.37>

- Kellogg, J. N., Camelio, G. B. F., & Mora-Páez, H. (2019). Cenozoic tectonic evolution of the North Andes with constraints from volcanic ages, seismic reflection, and satellite geodesy. In *Andean tectonics* (pp. 69–102). Elsevier.
- Kikuchi, M., & Kanamori, H. (1991). Inversion of complex body waves—III. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *81*(6), 2335–2350. <https://doi.org/10.1785/BSSA0810062335>
- Kikuchi, M., Kanamori, H., & Satake, K. (1993). Source complexity of the 1988 Armenian Earthquake: Evidence for a slow after-slip event. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *98*(B9), 15797–15808. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/93JB01568>
- Kuge, K., & Kawakatsu, H. (1990). Analysis of a deep “non double couple” earthquake using very broadband data. *Geophysical Research Letters*, *17*(3), 227–230.
- Langston, C. A. (1981). Source inversion of seismic waveforms: The Koyna, India, earthquakes of 13 September 1967. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *71*, 1–24. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1994.tb04680.x>
- Lay, T., & Wallace, T. (1995). *Modern Global Seismology*. (Vol. 58). Academic Press.
- Minson, S. E., & Dreger, D. S. (2008). Stable inversions for complete moment tensors. *Geophys J. Int.*, *174*, 585–592. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2008.03797.x>
- Mora, J. A., Oncken, O., Le Breton, E., Ibáñez-Mejía, M., Faccenna, C., Veloza, G., Vélez, V., de Freitas, M., & Mesa, A. (2017). Linking Late Cretaceous to Eocene Tectonostratigraphy of the San Jacinto Fold Belt of NW Colombia With Caribbean Plateau Collision and Flat Subduction. *Tectonics*, *36*(11), 2599–2629. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2017TC004612>
- Ojeda, A., & Havskov, J. (2001). Crustal structure and local seismicity in Colombia. *J. Seismol.*,

- 5, 575–593. <https://doi.org/10.1023/A:1012053206408>
- Pardo, N., Cepeda, H., & Jaramillo, J. (2005). The Paipa Volcano, Eastern Cordillera of Colombia, South America: Volcanic stratigraphy. *Earth Sciences Research Journal*, 9, 3–18.
- Pavlis, G. L., & Das, S. (2000). The Pamir-Hindu Kush seismic zone as a strain marker for flow in the upper mantle. *Tectonics*, 19(1), 103–115.
- Pennington, W. D., Mooney, W. D., van Hissenhoven, R., Meyer, H., Ramirez, J. E., & Meyer, R. P. (1979). Results of a reconnaissance microearthquake survey of Bucaramanga, Colombia. *Geophysical Research Letters*, 6, 65–68.
- Pindell, J. L., & Kennan, L. (2009). South America in the mantle reference frame: an update Tectonic evolution of the Gulf of Mexico, Caribbean and northern South America in the mantle reference frame: an update. *Geological Society of London Special Publication*, 328, 1–35.
- Poli, P., Prieto, G. A., Yu, C. Q., Florez, M., Agurto-Detzel, H., Mikesell, T. D., Chen, G., Dionicio, V., & Pedraza, P. (2016). Complex rupture of the M 6.3 2015 March 10 Bucaramanga earthquake: evidence of strong weakening process. *Geophysical Journal International*, 205(2), 988–994. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw065>
- Poveda, E., Julià, J., Schimmel, M., & Perez-Garcia, N. (2018). Upper and Middle Crustal Velocity Structure of the Colombian Andes From Ambient Noise Tomography: Investigating Subduction-Related Magmatism in the Overriding Plate. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(2), 1459–1485. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2017JB014688>
- Poveda, E., Monsalve, G., & Vargas, C. A. (2015). Receiver functions and crustal structure of the northwestern Andean region, Colombia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(4), 2408–2425. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2014JB011304>

- Prieto, G. A., Beroza, G. C., Barrett, S. A., López, G. A., & Florez, M. (2012). Earthquake nests as natural laboratories for the study of intermediate-depth earthquake mechanics. *Tectonophysics*, 570–571, 42–56. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.07.019>
- Richter, C. F. (1958). *ELEMENTARY SEISMOLOGY*.
- Saikia, C. K. (1994). Modified frequency-wavenumber algorithm for regional seismograms using Filon's quadrature: modeling of Lg wave in eastern North America. *Geophysical Journal International*, 118, 142–158. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1994.tb04680.x>
- Santo, T. (1969a). Characteristics of seismicity in South America. *Bulletin of the Earthquake Research Institute University of Tokyo*, 47, 635–672.
- Santo, T. (1969b). Regional study on the characteristic seismicity of the world, I, Hindu Kush region. *Bulletin of the Earthquake Research Institute University of Tokyo*, 47, 1035–1049.
- Scambelluri, M., Pennacchioni, G., Gilio, M., Bestmann, M., Plümpner, O., & Nestola, F. (2017). Fossil intermediate-depth earthquakes in subducting slabs linked to differential stress release. *Nature Geoscience*, 10(12), 960–966.
- 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. <https://doi.org/10.1029/JB092iB13p13913>
- Shih, X. R., Meyer, R. P., & Schneider, J. F. (1991). Seismic anisotropy above a subducting plate. *Geology*, 19(8), 807–810.
- Sipkin, S A. (2002). 50 USGS earthquake moment tensor catalog. *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*, 823–825. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0074-6142\(02\)80257-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0074-6142(02)80257-1)

- Sipkin, Stuart A. (1986). Interpretation of non-double-couple earthquake mechanisms derived from moment tensor inversion. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 91(B1), 531–547.
- Špičák, A. (2000). Earthquake Swarms and Accompanying Phenomena in Intraplate Regions: A Review. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 44(2), 89–106.
<https://doi.org/10.1023/A:1022146422444>
- Sun, M., Bezada, M. J., Cornthwaite, J., Prieto, G. A., Niu, F., & Levander, A. (2022). Overlapping slabs: Untangling subduction in NW South America through finite-frequency teleseismic tomography. *Earth and Planetary Science Letters*, 577, 117253.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.epsl.2021.117253>
- Suter, F., Sartori, M., Neuwerth, R., & Gorin, G. (2008). Structural imprints at the front of the Choco-Panama indenter. *Tectonophysics*, 460, 134–157.
- Syracuse, E. M., Maceira, M., Prieto, G. A., Zhang, H., & Ammon, C. J. (2016). Multiple plates subducting beneath Colombia, as illuminated by seismicity and velocity from the joint inversion of seismic and gravity data. *Earth and Planetary Science Letters*, 444, 139–149.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.03.050>
- Taboada, A., Rivera, L. A., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Philip, H., Bijwaard, H., Olaya, J., & Rivera, C. (2000). Geodynamics of the northern Andes: Subductions and intracontinental deformation (Colombia). *Tectonics*, 19(5), 787–813.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2000TC900004>
- Tibi, R., Bock, G., Xia, Y., Baumbach, M., Grosser, H., Milkereit, C., Karakisa, S., Zünbül, S., Kind, R., & Zschau, J. (2001). Rupture processes of the 1999 August 17 Izmit and November 12 Düzce (Turkey) earthquakes. *Geophysical Journal International*, 144(2), F1–F7.

- Tryggvason, E., & Lawson, J. R. E. (1970). The intermediate earthquake source near Bucaramanga, Colombia. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 60, 269–276. <https://pubs.geoscienceworld.org/ssa/bssa/article-abstract/60/1/269/334168/The-intermediate-earthquake-source-near?redirectedFrom=fulltext>
- Vargas, C. A., & Mann, P. (2013). Tearing and Breaking Off of Subducted Slabs as the Result of Collision of the Panama Arc-Indenter with Northwestern South America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(3), 2025–2046. <https://doi.org/10.1785/0120120328>
- Vavryčuk, V. (2015). Moment tensor decompositions revisited. *Journal of Seismology*, 19(1), 231–252. <https://doi.org/10.1007/s10950-014-9463-y>
- Vavryčuk, V., Adamová, P., Doubravová, J., & Ren, Y. (2021). Mapping stress and fluids on faults by nonshear earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(2), e2020JB021287.
- Veloza, G., Styron, R., Taylor, M., & Mora, A. (2012). Open-source archive of active faults for northwest South America. *Gsa Today*, 22(10), 4–10.
- Zahradnik, J., Jansky, J., & Plicka, V. (2008). Detailed waveform inversion for moment tensors of M~ 4 events: Examples from the Corinth Gulf, Greece. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98(6), 2756–2771.
- Zarifi, Z., & Havskov, J. (2003). Characteristics of dense nests of deep and intermediate-depth seismicity. *Adv. Geophys*, 46, 237–278. [https://doi.org/10.1016/S0065-2687\(03\)46004-4](https://doi.org/10.1016/S0065-2687(03)46004-4)
- Zarifi, Z., Havskov, J., & Hanyga, A. (2007). An insight into the Bucaramanga nest. *Tectonophysics*, 443(1–2), 93–105. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2007.06.004>

Apéndices

Apéndice A. Parámetros de fuente de los sismos pertenecientes al nido de Bucaramanga analizados.

Parámetros de los mecanismos focales – sismicidad de profundidad intermedia del nido de Bucaramanga											
N°	Fecha	Lat	Lon	Prof [km]	Mag	VR	Np1	Eje P	Eje T	Eje B	Tipo
	Y/M/D	(°)	(°)	Hyp - Cent	M _L - M _w	[%]	Az Buz Rk	Tr Pl	Tr Pl	Tr Pl	
1	2009/10/27*	6.804	-73.161	146.9 - 141	5.5 - 6.23	76.92	15 374 39	277 13	198 -39	352 -48	S
2	2012/09/01	6.825	-73.158	154 - 130	5.3 - 4.94	73.83	164 76 49	284 20	214 -44	356 -40	S
3	2013/07/25	6.816	-73.15	148.5 - 155	5.2 - 4.99	78.28	70 72 -157	112 -29	201 3	106 61	S
4	2013/12/30	6.811	-73.146	152 - 151	4.8 - 4.53	55.66	135 87 38	262 23	186 -28	319 -52	S
5	2014/02/07	6.798	-73.155	156 - 159	5.6 - 5.28	74.91	194 65 76	294 19	258 -67	20 -13	R
6	2014/03/30	6.796	-73.155	142.2 - 173	4.7 - 4.97	71.17	335 72 32	102 8	18 -35	181 -54	O
7	2014/04/30	6.815	-73.152	145 - 135	4.4 - 4.34	56.43	318 85 22	90 12	4 -19	150 -67	S
8	2014/07/26	6.83	-73.137	145.9 - 156	4.4 - 5.01	52.12	17 61 -84	122 -73	103 16	14 -5	N
9	2014/10/01	6.806	-73.139	156 - 146	4.5 - 4.37	60.15	124 76 -146	169 -34	251 12	144 54	S
10	2014/11/20	6.817	-73.165	153.6 - 130	4.4 - 4.45	87.41	112 74 -140	158 -39	236 14	130 47	S
11	2014/11/25	6.811	-73.142	152 - 185	5.1 - 5.09	49.2	39 89 96	123 44	135 -46	219 6	O
12	2015/03/10	6.825	-73.134	157.7 - 158	6.3 - 6.29	89.25	29 81 -64	146 -48	98 31	25 -36	N
13	2015/03/22	6.804	-73.147	154.6 - 166	5.2 - 4.78	51.1	53 62 138	111 5	196 -49	205 41	S
14	2015/09/07*	6.815	-73.145	150.1 - 135	4.4 - 6.02	53.96	199 83 115	268 33	315 -46	16 25	O
15	2015/11/28	6.819	-73.149	154 - 200	4.9 - 4.68	68.91	257 68 -84	358 -66	342 23	255 -6	N
16	2016/02/11	6.818	-73.135	154.2 - 144	4.8 - 4.5	61.26	174 80 45	297 22	225 -38	4 -44	S
17	2016/03/09	6.843	-73.147	148.3 - 145	4.8 - 4.63	68.46	178 47 93	266 2	314 -87	356 2	R
18	2016/06/23*	6.815	-73.162	149.1 - 135	4.7 - 5.82	48.43	12 83 -114	77 -47	122 34	15 24	O
19	2016/07/26	6.801	-73.158	152.9 - 130	4.7 - 4.51	77.58	108 67 -148	148 -38	235 4	140 51	S
20	2016/09/22	6.83	-72.972	163.1 - 120	4.9 - 4.73	73.91	306 82 143	359 19	77 -31	116 52	S
21	2017/02/01	6.773	-73.164	149 - 120	4.6 - 4.33	65.68	284 88 140	337 25	52 -29	102 50	S
22	2017/09/04	6.827	-73.145	156 - 195	4.8 - 4.7	67.34	105 78 -155	149 -26	235 8	129 62	S
23	2018/01/08	6.839	-73.139	154.7 - 146	5.2 - 4.96	75.89	315 82 163	2 6	90 -18	111 71	S

24	2018/01/21	6.837	-73.139	147.7 - 195	4.4 - 5.33	41.91	322 67 34	88 5	2 -40	172 -50	O
25	2018/02/04*	6.823	-73.159	152.6 - 115	4.4 - 5.38	70.9	183 67 -102	252 -66	282 21	188 11	N
26	2018/05/20	6.805	-73.174	149.72 - 147	5.0 - 4.59	69.68	159 77 36	285 14	205 -34	356 -52	S
27	2018/05/31	6.814	-73.143	148.99 - 161	___ - 4.56	58.54	357 60 -95	74 -74	91 15	360 4	N
28	2018/08/07	6.87	-73.109	150.02 - 172	___ - 5.44	82.09	91 76 22	222 5	134 -25	302 -64	S
29	2020/01/04	6.84	-73.146	150.58 - 152	___ - 4.97	67.94	237 82 121	302 30	358 -44	52 31	O
30	2020/01/14	6.815	-73.15	150.27 - 190	___ - 4.7	54.07	199 84 19	332 9	244 -18	36 -70	S

Nota. * en la fecha del sismo indica soluciones menos robustas. En la columna del tipo (última de izquierda a derecha), S indica un mecanismo de tipo strike-slip, O indica un mecanismo oblicuo, N es un mecanismo normal y R es un mecanismo de tipo inverso o de cabalgamiento.