



Cálculo y análisis de los mecanismos focales del Nido sísmico de

Bucaramanga a partir de registros de la red sismológica nacional

Author Template: Instruction for preparation of manuscript

Manuel Villamizar^a; Francisco Cabrera^a

^a Universidad de Pamplona, Grupo de investigación PANGEA, Colombia

Correspondencia: manuel.villamizar3@unipamplona.edu.co

Recibido: Febrero 15, 2022. Aceptado: Abril, 2022. Publicado: Julio, 2022

Resumen

En el presente trabajo se analizan los mecanismos focales de 32 sismos con magnitud $M_I \geq 4$ en la región de Santander conocida como el Nido Sísmico de Bucaramanga, para el periodo 2008-2018. Las soluciones de los mecanismo focales son determinadas utilizando el método de polaridad analizando el primer arribo de la onda P a las diferentes estaciones sísmicas ubicadas al rededor de la región de interés, comprendida entre los -74° hasta los -72° de latitud, y entre los 6.7° hasta los 6.9° de longitud. Los datos de las formas de ondas se obtuvieron a partir de catálogo de la red sismológica nacional de Colombia (RNSC), considerando el hecho de que la mayoría de los sismos se producen en un rango de profundidad que va desde los 140 Km hasta los 160 Km. Con los resultados obtenidos se estima un volumen de 902 Km^3 ubicado debajo de la Mesa de los Santos, este volumen representaría una parte importante del Nido, debido a su alta concentración sísmica. Las soluciones de los mecanismos focales obtenidas, no permiten establecer una conexión directa y clara en relación a los procesos de subducción que ocurren entre las placas tectónicas Caribe-Sudamericana y Nazca-Sudamericana.

Palabras clave: Mecanismo focal; plano de falla; onda P.

Abstract:

In the present document, the focal mechanisms of 32 earthquakes with magnitude $M_I \geq 4$ in the Santander region known as the Seismic Nest of Bucaramanga, for the period 2008-2018, were analyzed. The solutions of the focal mechanisms are determined using the polarity method by analyzing the first arrival of the P wave at different seismic stations located around the region of interest, found between -74° up to -72° latitude, and between 6.7° to 6.9° longitude. The waveform data was obtained from the catalog of the National Seismological Network of Colombia (RNSC), considering the fact that most earthquakes occur in a depth range that goes from 140 km to 160 km. With the results obtained, a volume of 902 Km^3 located under the Mesa de los Santos is estimated, this volume would represent an important part of the Nest, due to its high seismic concentration. The solutions of the focal mechanisms obtained do not allow establishing a direct and clear connection in relation to the subduction processes that occur between Caribbean-South American and Nazca-South American tectonic plates.

Keywords: Focal mechanism; Fault plane; P wave.

1. Introducción

La solución del mecanismo focal de un sismo es el resultado del análisis de las formas de las ondas sísmicas generadas por un terremoto, registradas en una serie de estaciones sísmicas en forma de sismogramas. El estudio del mecanismo focal de los sismos consiste en determinar los procesos físicos que han tenido lugar en el foco del sismo (lugar en el subsuelo en donde se originó el sismo), siendo uno de los aspectos de especial interés, el obtener la posible orientación del plano de falla (fractura) asociada al sismo. En general, determinar el mecanismo focal se plantea como un problema inverso: a partir de las observaciones (formas de onda), o sea los registros del sismo en las diferentes

estaciones, se deben deducir los parámetros que definen los procesos sísmicos ocurridos en el foco. Este planteamiento implica un conocimiento de las propiedades elásticas del medio, ya que el sismograma es el resultado de los procesos ocurridos en el foco sísmico, combinados con el efecto de propagación de las ondas a través del medio que se asume elástico, más, las características de los receptores utilizados para registrar el sismo [1].

Como se observa en la Fig. 1, una falla está constituida estructuralmente por dos bloques separados un plano, denominado el plano de falla. Los bloques se denominan bloque de piso y bloque de techo según la disposición que tengan con respecto al plano de

falla. En general existen tres tipos principales de fallas: normal, inversa y transcurrente. Esta clasificación depende del movimiento relativo de un bloque con respecto al otro (cinemática de la falla). j

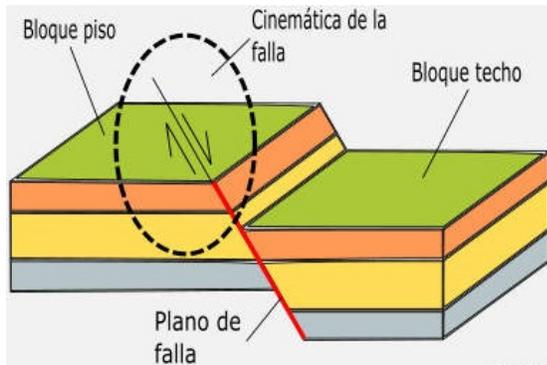


Figura 1: Elementos estructurales de una falla. (Imagen tomada de [2])

Definiendo un sistema coordenado $(x_1x_2x_3)$ como el que se muestra en la Fig. 2, para describir la orientación del plano de falla, se definen los siguientes ángulos: el rumbo (Strike) representado por ϕ_f , es el ángulo que forma el eje x_1 con el norte geográfico, el buzamiento (dip) representado por δ , es ángulo que forma el plano de falla con el plano x_1x_2 , la dirección de deslizamiento (Slip) representado por λ , es el ángulo que forma el vector de deslizamiento \hat{d} con el eje x_1 . A partir de estos tres ángulos, es posible determinar el vector unitario \hat{n} que es normal al plano de falla y el vector unitario \hat{d} que se encuentra ubicado sobre el plano de falla. El vector \hat{d} representa la dirección del movimiento relativo del bloque de techo con respecto al bloque de piso [15].

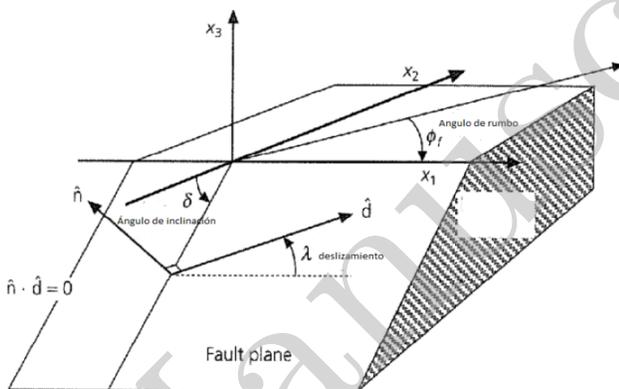


Figura 2: Parámetros y ángulos de una falla. (Imagen tomada de [12])

Cuando ocurre un sismo, es posible realizar una clasificación por cuadrantes en la región que rodea al foco sísmico, mediante el análisis del primer arribo de las ondas sísmicas a las diferentes estaciones. Como se observa en la Fig. 3, los cuadrantes están delimitados por las intersecciones de los planos nodales que dividen la región en dos zonas de compresión y dos zonas de extensión (dilatación). Uno de estos planos corresponde al plano

de falla y el otro es llamado plano auxiliar, este plano, tiene la característica que es perpendicular al plano de falla.

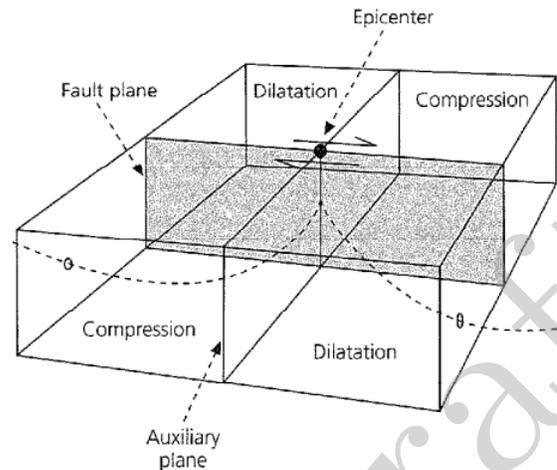


Figura 3: Planos nodales y cuadrantes para las zonas de compresión y extensión. (Imagen tomada de [12])

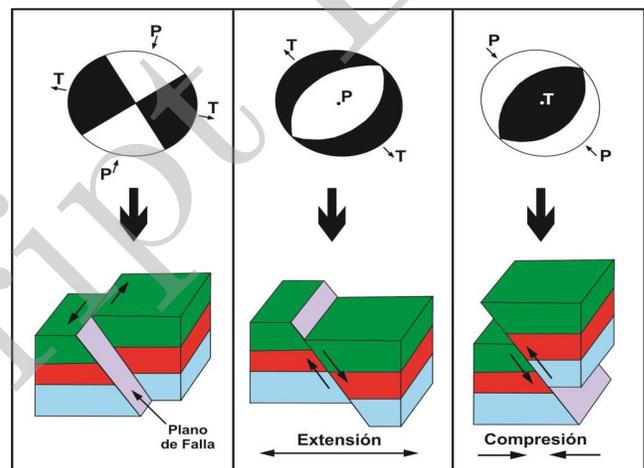


Figura 4: Balones de playa asociados al mecanismo focal de los tres tipos de fallas principales (transcurrente, normal e inversa, respectivamente). (Imagen tomada de [2])

La solución del mecanismo focal de un sismo se puede representar gráficamente mediante un diagrama denominado "balón de playa" (ver Fig. 4), este diagrama es una proyección estereográfica de la esfera focal (esfera que se construye al rededor del punto geográfico en donde se originó el sismo). Este diagrama delimita las zonas de compresión y extensión, permitiendo identificar la orientación del plano de falla y del plano auxiliar. En el diagrama de balón de playa se puede plantear un nuevo sistema coordenado compuesto por tres ejes ortogonales: el eje P (esfuerzos compresivos), el eje T (esfuerzos de tensión) y eje B (eje nulo) [12].

En la Fig. 4 se observa la relación que existe entre los ejes P y T, en relación a la orientación de los planos nodales del diagrama de

balón de playa. Estos ejes (P y T) forman un ángulo de 45° con los planos nodales. En los diagramas de la Fig. 4 las zonas negras son de compresión y las zonas blancas son de extensión [16].

2. Marco tectónico y sismicidad

El norte de Colombia está ubicado en la intersección de tres placas: la de Nazca al occidente, la del Caribe al norte y la Sudamericana al sur (líneas rojas en la Fig. 5).

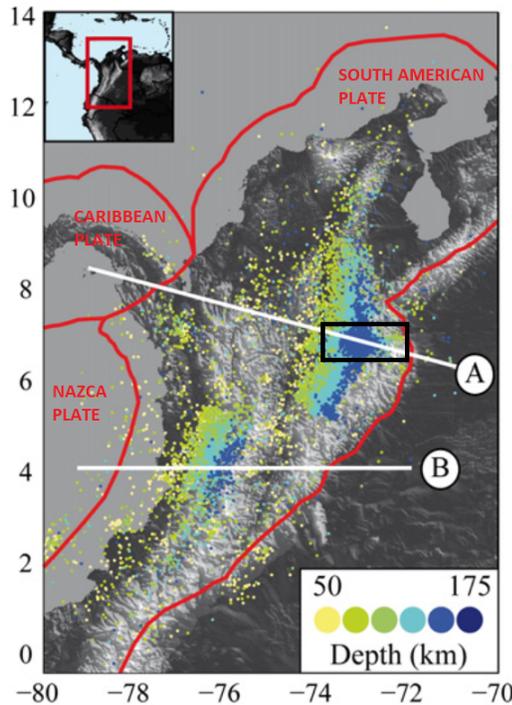


Figura 5: Sismicidad en Colombia basada en el catálogo RSNC (Red Sismológica Nacional de Colombia) codificado por colores por profundidad. La vista del mapa muestra los principales límites de las placas tectónicas. (Imagen modificada de [9])

Varios modelos se han propuesto para explicar la tectónica de la región, ver [3], [6], [7], [13], [14], [17] y [18]. Los modelos planteados por estos autores difieren entre sí, por lo que no es posible afirmar con certeza a qué interacción de las placas se le asocia la sismicidad del nido de Bucaramanga.

Según [4], [7] y [14], se plantea que una porción de la placa del Caribe se está introduciendo en dirección sureste por debajo de la placa Sudamericana. Para ellos, el nido de Bucaramanga se encuentra en la región suroriental del punto de encuentro de estas placas. Estos autores plantean también que la placa de Nazca se subduce hacia el este, pero en la región del nido de Bucaramanga se desvía hacia al sur. Otro modelo propuesto en [17] sugiere que el nido de Bucaramanga está ubicado en la placa de Nazca en un segmento que llaman la "Losa de Bucaramanga". Un tercer modelo planteado en [18], está basado en la obtención de los mecanismos focales de los sismos en el

nido de Bucaramanga y sugiere que la colisión entre las placas de Nazca y del Caribe en profundidad es la responsable de la sismicidad del nido.

En la Fig. 5 se muestra la sismicidad en el territorio nacional, las líneas A y B hacen referencia a las interacciones de las placas Caribe-Sudamericana y Nazca-Sudamericana, respectivamente. Se observan dos regiones donde se concentra la actividad sísmica: al nororiente, la zona de la línea A que abarca en gran proporción la región del departamento de Santander, y al suroccidente, la zona de la línea B que abarca en gran medida la región del departamento del Valle del Cauca [9].

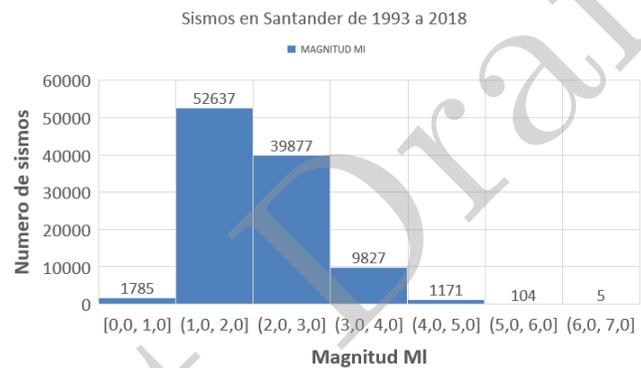


Figura 6: Histograma de la sismicidad en el departamento de Santander para el periodo 1993-2018. (Fuente: Autores.)

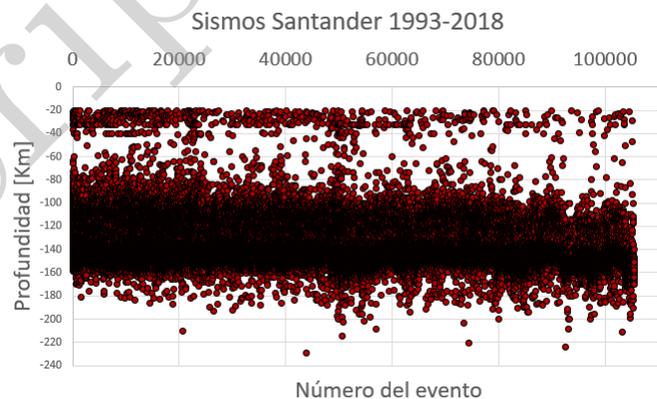


Figura 7: Distribución en profundidad de la sismicidad en el departamento de Santander para el periodo 1993-2018. Los sismos están graficados en orden cronológico. (Fuente: Autores.)

La Fig. 6 muestra la distribución en magnitud de los sismos en el departamento de Santander, según los reportes de la RSNC para el periodo 1993-2018, los datos corresponden a 107.562 registros sísmicos. Se observa una gran concentración entre las magnitudes 1.0 y 3.0, aproximadamente del 80 % de la totalidad de la actividad sísmica. El número de sismos reportados con una magnitud mayor a 4.0 representan aproximadamente el 1,2 % del total.

En la Fig. 7 se muestra la distribución de la actividad sísmica en profundidad, se observa una concentración particular para las profundidades entre los 140 Km y los 160 Km, a este rango se le asocia la ubicación del nido de Bucaramanga según lo reportado en [9].

3. Datos y método

Para este estudio se limitó la región comprendida entre las coordenadas -74° y -72° de longitud, y $6,7^\circ$ y $6,9^\circ$ de latitud, esta región rectangular (ver Fig. 5) abarca principalmente el departamento de Santander y algunas zonas de los departamentos colindantes. Debido a que el número de sismos es muy grande; para la selección se hizo énfasis en la zona conocida como la Mesa de los Santos, de tal manera que un primer filtro, consistió en seleccionar sismos cuyo epicentro se localice dentro de esta zona. Un segundo filtro consistió en seleccionar sismos reportados con una magnitud MI mayor a 4, de tal manera, se garantice tener la información suficiente para las formas de onda, en las diferentes estaciones ubicadas alrededor de la zona de estudio (específicamente datos relacionados con la polaridad del primer arribo de la onda P).

En la tabla 1, se presenta la información de los 32 sismos seleccionados con los criterios mencionados anteriormente. Estos sismos fueron reprocesados y la información sobre la localización fue contrastada con la reportada en el catálogo sísmico de la RSNC. Para este fin se utilizó el software libre SEISAN, mediante el cual se procesaron las formas de onda descargadas directamente de la página del Servicio Geológico Colombiano (<https://www.sgc.gov.co>). El procedimiento inicial fue descargar y registrar las formas de onda en una base de datos creada dentro del SEISAN. Posteriormente se procedió a realizar el proceso del "picado" (picking) de cada forma de onda mediante la visualización de las trazas en cada una de las estaciones disponibles. En este proceso de picado, se identifican y registran los tiempos de llegada del primer arribo a las diferentes estaciones, teniendo en cuenta el análisis de la polaridad. La solución de los mecanismos focales se obtuvo mediante el programa FOCMEC basado en el código escrito por Arthur Snoke [11].

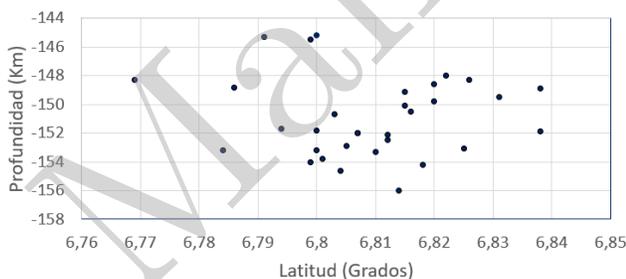


Figura 8: Distribución en latitud y profundidad de los 32 sismos para el periodo 2008 – 2018. (Fuente: Autores.)

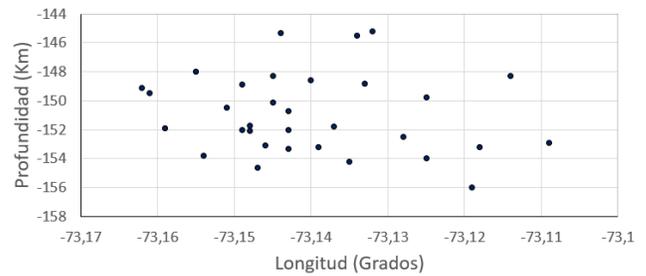


Figura 9: Distribución en longitud y profundidad de los 32 sismos para el periodo 2008 – 2018. (Fuente: Autores.)

En la Fig. 8, se muestra un corte en latitud de la distribución de los sismos en profundidad, cuyos mecanismos focales son analizados en este trabajo. Las localizaciones de los hipocentros de los eventos, indican que las profundidades abarcan un rango desde los 140 Km hasta los 160 Km. En el gráfico se observa que la distribución de los sismos no muestra un patrón o tendencia que se pueda asociar directamente a las interacciones entre las placas Nazca-Sudamericana o Caribe-Sudamericana, respectivamente.

En la Fig. 9, se muestra un corte en longitud de la distribución de los sismos en profundidad; al igual que en el caso de la Fig. 8 no se aprecia algún patrón o tendencia que se pueda asociar directamente a la interacción entre las placas mencionadas anteriormente; se puede decir entonces que la región seleccionada que está debajo de la Mesa de los Santos no es lo suficientemente amplia como para ser un reflejo directo del proceso de subducción de las placas Nazca-Sudamericana y Caribe-Sudamericana. Según los valores de la tabla 1, se estima un volumen para la región de estudio de aproximadamente 902 Km^3 . Este valor para el volumen corresponde al producto de las variaciones en latitud, longitud y profundidad, aproximadamente de 7.66 Km, 5.88 Km y 20 Km, respectivamente (variaciones de los valores en la Tabla 1).

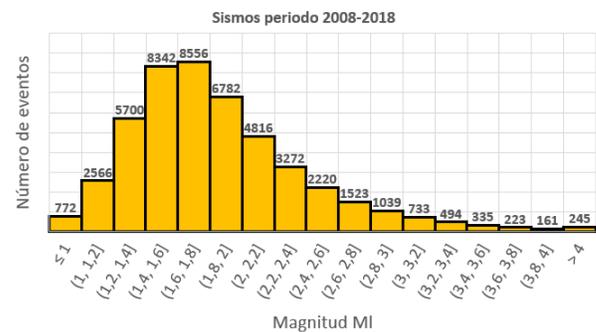


Figura 10: Histograma de la actividad sísmica para el periodo 2008 – 2018. En el rango de profundidad de 140 Km a 160 Km.

En la Fig. 10, se muestra un histograma de la actividad sísmica para la región limitada entre las coordenadas $6,7^\circ$ y $6,9^\circ$ de latitud, -74° y -72° de longitud, en un rango de profundidad desde los 140 Km hasta los 160 km. Se observa la distribución

Tabla 1: Selección de sismos con magnitud $M_I \geq 4$ reportados con epicentro en la Mesa de los Santos durante el periodo de 2008 – 2018.

N°	Fecha	Tiempo (UTC)	Latitud (Norte)	Longitud (Oeste)	Profundidad (Km)	Magnitud M_I	RMS (S)	E.Lat (Km)	E.Long (Km)	E.Prof (Km)
1	2011-08-08	22:42:29	6,769°	73,114°	148,3	4,1	0,3	2,2	3,1	3,5
2	2013-07-05	10:37:51	6,838°	73,149°	148,9	4,6	0,5	2,6	3	3,7
3	2013-07-29	09:17:48	6,826°	73,145°	148,3	4	0,4	2,4	2,5	4
4	2014-08-10	02:27:14	6,8°	73,137°	151,8	4,1	0,5	1,9	2,6	3,8
5	2015-02-21	02:14:11	6,786°	73,133°	148,8	4,3	0,5	2,1	3,1	3,9
6	2015-03-08	00:26:08	6,803°	73,143°	150,7	4	0,5	2,2	2,6	4
7	2015-03-22	22:27:37	6,804°	73,147°	154,6	5	0,4	2	2,1	3,4
8	2015-03-24	20:52:27	6,801°	73,154°	153,8	4,5	0,4	2,5	2,4	4
9	2015-07-01	05:55:26	6,8°	73,132°	145,2	4,6	0,5	1,5	2,5	3,7
10	2015-07-05	08:54:21	6,814°	73,119°	156	4,4	0,6	1,8	2,4	3,8
11	2015-07-26	10:13:06	6,82°	73,14°	148,6	4	0,6	2	2,9	4
12	2015-08-06	21:41:41	6,822°	73,155°	148	4	0,6	1,9	2,4	3,7
13	2015-08-30	15:13:12	6,8°	73,118°	153,2	4,2	0,5	1,6	2	3,3
14	2015-09-07	17:35:31	6,815°	73,145°	150,1	4,4	0,6	1,8	2,4	3,5
15	2016-01-01	05:28:57	6,816°	73,151°	150,5	4	0,5	1,8	2,3	3,6
16	2016-01-04	21:05:56	6,784°	73,139°	153,2	4,3	0,5	2	2,4	3,6
17	2016-01-24	09:28:53	6,838°	73,159°	151,9	4,3	0,6	2,2	2,3	4
18	2016-02-11	07:14:37	6,818°	73,135°	154,2	4,7	0,6	1,9	2,2	3,8
19	2016-03-09	05:23:56	6,831°	73,161°	149,5	4,3	0,5	1,9	2,2	3,6
20	2016-05-11	14:46:09	6,812°	73,128°	152,5	4,2	0,5	2,1	2,6	4
21	2016-06-23	22:28:56	6,815°	73,162°	149,1	4,7	0,5	1,8	2,1	3,1
22	2016-08-26	04:55:15	6,807°	73,143°	152	4,5	0,5	1,7	2	3,3
23	2016-09-13	08:12:15	6,799°	73,134°	145,5	4,1	0,6	2,2	2,5	4
24	2016-09-16	02:37:40	6,807°	73,149°	152	4,1	0,5	2,3	2,4	3,7
25	2016-10-24	12:06:13	6,794°	73,148°	151,7	4,2	0,5	2,3	2,5	3,8
26	2016-12-13	20:32:20	6,799°	73,125°	154	4,4	0,5	2,1	2,4	3,5
27	2016-12-19	10:24:20	6,82°	73,125°	149,8	4,6	0,5	2,6	2,5	3,7
28	2017-02-16	03:04:39	6,825°	73,146°	153,1	4	0,6	2,4	2,6	3,9
29	2017-04-17	07:49:24	6,791°	73,144°	145,3	4,6	0,6	1,8	2,2	3,1
30	2017-05-07	02:10:08	6,805°	73,109°	152,9	4,4	0,6	1,9	2,6	4
31	2017-08-13	11:43:34	6,81°	73,143°	153,3	4,1	0,4	2	1,9	3,1
32	2017-08-17	21:03:50	6,812°	73,148°	152,1	4,3	0,6	1,9	2,1	3,2

en magnitud M_I de 47.800 sismos (aprox), este número equivale al 44,6 % de la actividad sísmica de la Fig. 6, por lo que se evidencia la alta concentración sísmica que existe en este rango de profundidad. En la Fig. 10, se observa que la mayor parte de los sismos (aproximadamente el 84 %) se encuentran entre las magnitudes 1,1 y 2,4. Por otro lado, del 16 % de la sismicidad restante, una parte corresponde a los 406 sismos que tienen una magnitud mayor o igual a 3,9 (cantidad menor al 1 % del total); de hecho es interesante resaltar que solo existen 14 eventos reportados con una magnitud mayor o igual a 5,0, y de ese grupo, solo hay un sismo con una magnitud mayor a 6,0. Lo anterior es un indicador de que en la región, la energía que se puede acumular debido al complejo sistema de esfuerzos del subsuelo, se libera de forma permanente mediante la ocurrencia de sismos de magnitud baja. En el periodo de 2008 - 2018 en el

catálogo del servicio geológico de la RSNC, se reportaron un total de 18.421 sismos para las coordenadas de latitud y longitud (máximas y mínimas) de la tabla 1 en el rango de profundidad de 140 a 160 Km. Contrastando esa información con la de la Fig. 10, de los aproximadamente 47.800 sismos, el 38,6 % tienen su hipocentro localizado dentro del volumen anterior de 902 Km^3 , por consiguiente, este volumen ubicado debajo de la Mesa de los Santos representaría una parte importante del Nido sísmico de Bucaramanga, debido a su alta concentración de actividad sísmica.

Tabla 2: Parámetros de la solución del mecanismo focal para la selección de sismos con magnitud $M_I \geq 4$ reportados con epicentro en la Mesa de los Santos durante el periodo de 2008 – 2018.

N°	Fecha	Strike ϕ	Dip δ	Slip λ	Error Strike	Error Dip	Error Slip	Strike P Φ_P	Plunge P Θ_P	Strike T Φ_T	Plunge T Θ_T
1	2011-08-08	0°	72°	18°	3°	8°	6°	132,26°	0,61°	41,97°	25,23°
2	2013-07-05	0°	23°	54°	3°	5°	6°	117,37°	25,3°	328,94°	60,98°
3	2013-07-29	78°	30°	-82°	3°	2°	2°	323,73°	74,26°	162,15°	15,2°
4	2014-08-10	128°	19°	118°	3°	3°	2°	195,97°	27,23°	355,33°	60,67°
5	2015-02-21	76°	71°	-175°	3°	1°	5°	118,63°	16,77°	211,65°	9,9°
6	2015-03-08	7°	29°	-2°	7°	9°	6°	162,56°	39,08°	34,28°	37,34°
7	2015-03-22	67°	78°	138°	4°	4°	3°	123,37°	18,41°	198,53°	37,58°
8	2015-03-24	49°	72°	158°	5°	7°	4°	98,01°	1,91°	186,98°	28,06°
9	2015-07-01	86°	85°	38°	2°	4°	1°	212,89°	21,84°	136,1°	29,69°
10	2015-07-05	23°	40°	-42°	7°	2°	1°	193,06°	57,76°	80,25°	13,74°
11	2015-07-26	19°	51°	-2°	1°	1°	1°	161,92°	27,66°	57,65°	25,2°
12	2015-08-06	8°	70°	-22°	3°	4°	5°	146,8°	29,39°	57,03°	0,4°
13	2015-08-30	48°	38°	13°	4°	4°	5°	188,86°	27,34°	77,22°	40,93°
14	2015-09-07	128°	78°	-144°	1°	4°	2°	174,61°	33,61°	254,32°	15,04°
15	2016-01-01	57°	78°	-42°	8°	7°	2°	188,53°	37,58°	113,37°	18,41°
16	2016-01-04	28°	47°	-62°	3°	4°	1°	192,61°	69,86°	98,61°	1,47°
17	2016-01-24	114°	83°	-146°	4°	2°	4°	162,11°	28,6°	242,01°	17,84°
18	2016-02-11	70°	69°	158°	1°	1°	1°	119,03°	0,35°	209,24°	30,05°
19	2016-03-09	119°	80°	-144°	6°	7°	5°	166,5°	32,15°	245,66°	16,65°
20	2016-05-11	138°	42°	-180°	6°	9°	2°	171,79°	31,7°	284,21°	31,7°
21	2016-06-23	31°	51°	18°	1°	1°	4°	165,39°	15,97°	62,49°	37,94°
22	2016-08-26	6°	40°	-42°	4°	1°	3°	176,06°	57,76°	63,25°	13,74°
23	2016-09-13	0°	39°	77°	1°	2°	2°	99,22°	6,66°	330,38°	79,46°
24	2016-09-16	15°	46°	-2°	3°	3°	3°	160,18°	30,59°	51,65°	28,26°
25	2016-10-24	18°	45°	17°	2°	3°	3°	154,3°	20,72°	45,62°	40,25°
26	2016-12-13	20°	69°	-43°	1°	3°	3°	156,7°	44,72°	78,17°	11,35°
27	2016-12-19	19°	40°	58°	1°	1°	1°	131,29°	8,99°	18,26°	67,99°
28	2017-02-16	63°	7°	38°	7°	8°	5°	200,07°	40,25°	31,17°	49,02°
29	2017-04-17	1°	41°	16°	1°	4°	4°	139,05°	23,94°	25,99°	41,42°
30	2017-05-07	104°	42°	-102°	7°	7°	4°	88,47°	81,22°	202,47°	3,59°
31	2017-08-13	16°	48°	17°	3°	4°	3°	151,53°	18,63°	45,79°	38,81°
32	2017-08-17	125°	16°	158°	4°	9°	2°	159,44°	37,35°	310,2°	48,83°

4. Resultados y discusión

En la tabla 2 se presentan los parámetros de la solución de los mecanismos focales para los 32 eventos seleccionados (tabla 1); se muestran los valores de los ángulos que describen la orientación del plano de falla (strike, dip, slip), así como los valores de los ángulos asociados a los ejes **P** (Presión) y **T** (Tensión). El ángulo Φ es el ángulo que forma la proyección del eje (P o T) sobre el plano (x_1x_2) (Ver Fig. 2) con el Norte geográfico, el ángulo Θ es el ángulo que forma el eje (P o T) con el eje vertical (Eje x_3) [1].

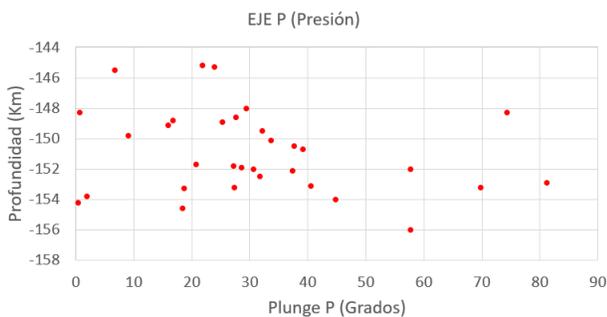


Figura 11: Representación de los ángulos de inmersión (Plunge) del eje de esfuerzos P. (Fuente: Autores.)

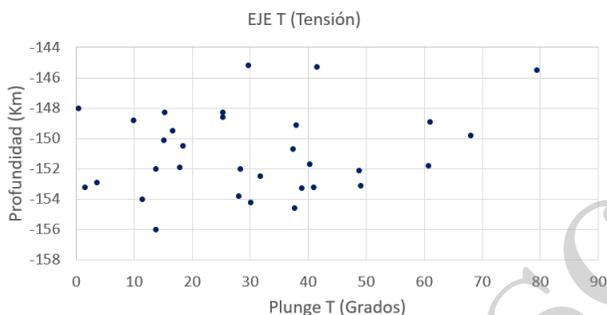


Figura 12: Representación de los ángulos de inmersión (Plunge) del eje de esfuerzos T. (Fuente: Autores.)

En la Fig. 11 y 12 se representan gráficamente la distribuciones en profundidad del ángulo de inmersión (Θ) de los ejes de esfuerzos compresivos (P) y distensivos (T) de los mecanismos focales para los eventos de la tabla 2. La Fig. 11 muestra que el eje de los esfuerzos compresivos tiene un ángulo de inmersión que para la mayoría de eventos varía entre 15° y 45° . Por otro lado, la Fig. 12 muestra que el eje de esfuerzos distensivos tiene un rango de variación un poco más amplio para la mayoría de los eventos, teniendo un rango de variación entre 10° y 50° . Según lo anterior, no es posible establecer un ángulo de inmersión predominante para los ejes de esfuerzos de los sismos analizados. Teniendo en cuenta el hecho de que los eventos tienen localizaciones similares, se esperaría algún tipo de predominancia en cuanto a los valores de los ángulos de la tabla 2, particularmente para los ángulos de inmersión, de

manera que dichos valores se pudieran asociar en cierta medida a las interacciones y los procesos de subducción de las placas Caribe-Sudamericana y Nazca-Sudamericana [10].

En las Fig. 13 y 14 se muestran los diagramas de los balones de playa para los 32 sismos seleccionados. La solución de los mecanismos focales fue obtenida mediante el programa FOCMEC [11]. En estos gráficos, P es el eje de presión, T es el eje de tensión y B es el eje nulo; U representa al vector de deslizamiento y se encuentra ubicado sobre la línea que representa el plano de falla en el diagrama; U' se asocia a la línea que representa el plano auxiliar. Se observa que de los 32 diagramas de las Fig. 13 y 14: 6 corresponden a fallas transcurrente inversas, 9 a fallas oblicuas inversas, 1 a una falla inversa; 4 corresponden a fallas transcurrentes normales, 9 a fallas oblicuas normales, 2 a fallas normales y 1 que corresponde a una falla transcurrente. La clasificación se hizo según los valores definidos en [5]. Se observa que los diagramas de los balones de playa exhiben una alta variabilidad en su forma, siendo en su mayoría combinaciones de los tres tipos de mecanismos principales (normal, inverso y transcurrente), lo anterior posiblemente se deba a la complejidad en términos estructurales de la zona de estudio.

Un aspecto a resaltar es el siguiente, a pesar de que los hipocentros de los sismos se encuentran a profundidades similares, no se observa un tipo de mecanismo focal predominante o que posea algún patrón; sin embargo, se puede afirmar que existe una distribución equilibrada entre mecanismos normales e inversos para los sismos de la zona de estudio. Una posible causa a esto sería la alta frecuencia sísmica de la zona, que pudo dar origen a un complejo sistema de fracturas, que según lo planteado en [9] se trataría de un sistema de fracturas con una distribución conformada por planos horizontales. Por ejemplo, según la tabla 1, los sismos 1 y 3 estarían ubicados sobre el mismo plano, ya que su profundidad es la misma, sin embargo como se observa en la tabla 2 y en la Fig. 13 sus mecanismos focales difieren bastante entre sí. Ahora, si se analiza el sismo 7, de este se podría decir que se encuentra en un plano distinto al de los sismos 1 y 3, debido a que la profundidad de su hipocentro es mayor.

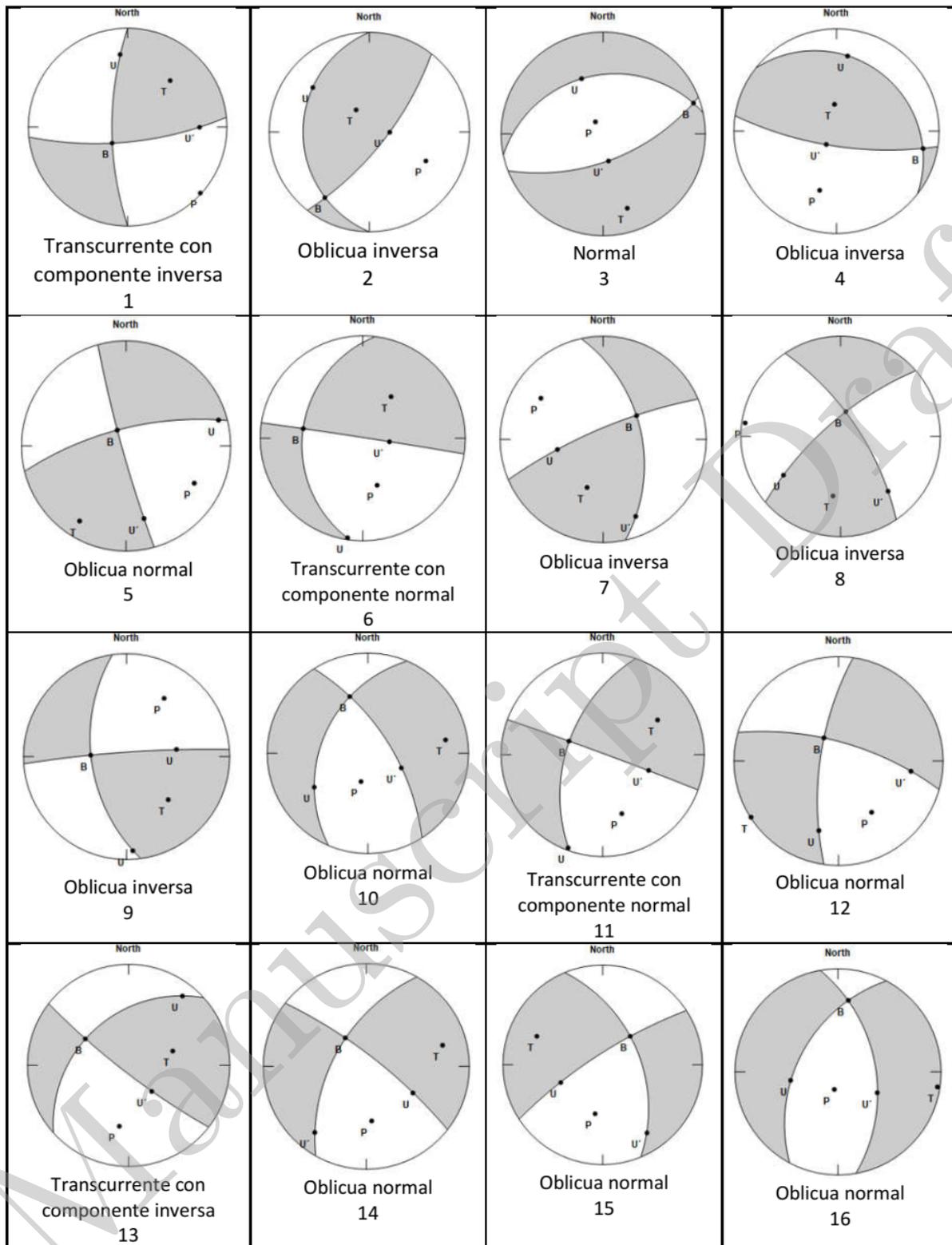


Figura 13: Gráficos de los balones de playa para los 32 sismos seleccionados. La numeración corresponde al orden de la tabla 1, en la parte inferior se especifica el tipo de falla asociada al diagrama. (Fuente: Autores.)

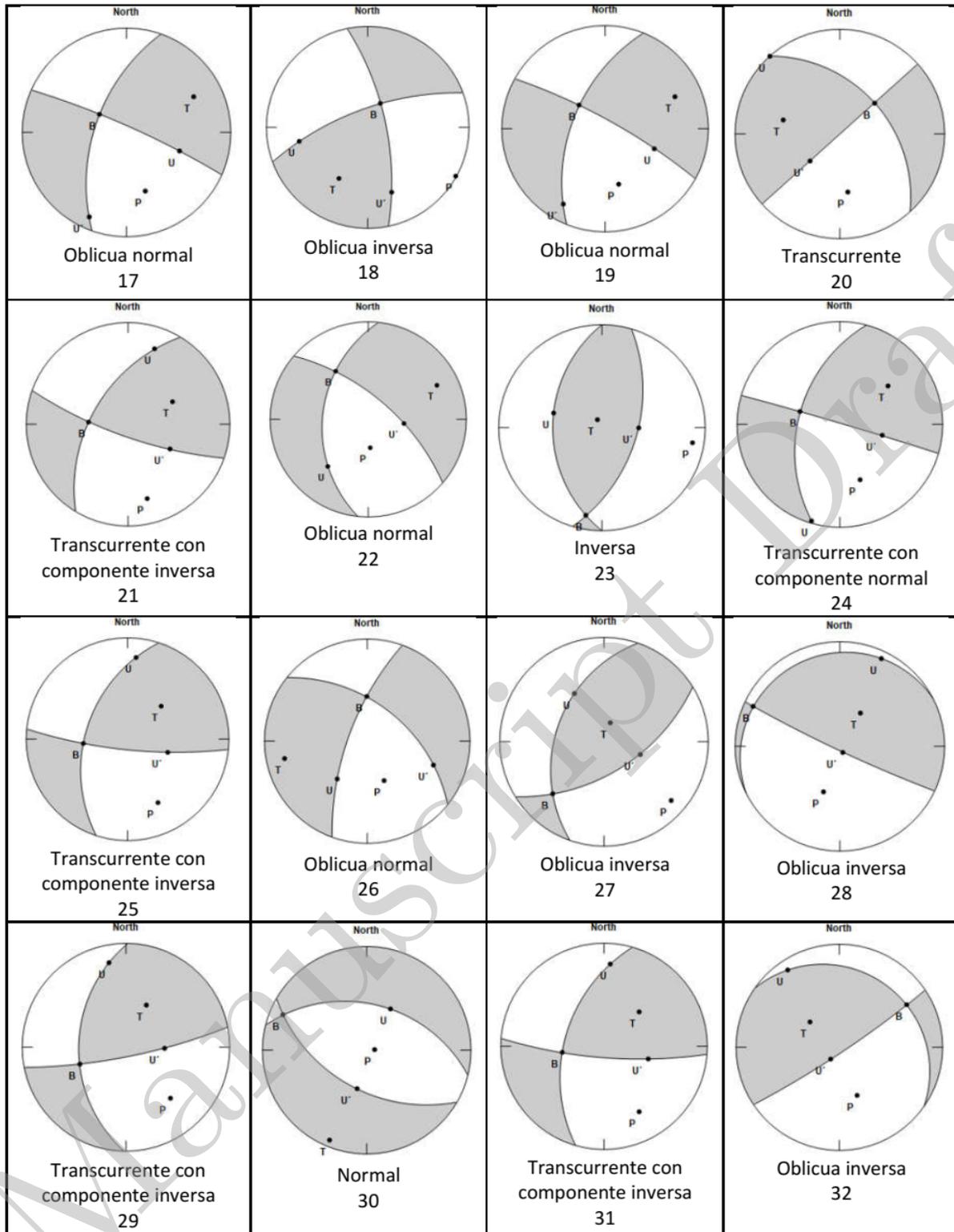


Figura 14: Gráficos de los balones de playa para los 32 sismos seleccionados. La numeración corresponde al orden de los sismos en la tabla 1, en la parte inferior se especifica el tipo de falla asociada a cada diagrama, según los parámetros de la tabla 2. (Fuente: Autores.)

5. Conclusiones

La actividad sísmica del nido de Bucaramanga en su gran mayoría corresponde a sismos cuyas magnitudes M_l oscilan entre 1.0 y 3.0, lo anterior es un indicador de que en la región la energía que se puede acumular debido al complejo sistema de esfuerzos presentes en la zona, se libera de forma constante y continua mediante la ocurrencia de sismos de magnitud baja.

En el presente trabajo se hizo énfasis en el estudio de una pequeña región con un volumen de 902 Km^3 ubicada debajo de la Mesa de los Santos, los hipocentros de los 32 sismos procesados y analizados se encuentran ubicados dentro de este volumen. Para el periodo de tiempo 2008-2018, de la actividad sísmica registrada entre las coordenadas ($6,7^\circ$ - $6,9^\circ$) de latitud y (72° - 74°) de longitud, en el rango de profundidad desde los 140 Km hasta los 160 Km, se determinó que el 38,6 % de esa actividad sísmica se originó dentro del volumen mencionado anteriormente. Por consiguiente, este volumen representa una parte importante del Nido de Bucaramanga.

Los mecanismos focales de los 32 sismos procesados y analizados exhiben una alta variabilidad en cuanto a sus diagramas y parámetros característicos, incluso para aquellos sismos cuyos hipocentros fueron determinados a profundidades similares. Los resultados no permiten establecer una conexión directa entre los mecanismos focales de la región de estudio y los procesos de subducción que ocurren entre las placas Caribe-Sudamericana y Nazca-Sudamericana. Lo anterior puede deberse a la complejidad estructural de la zona del Nido, que según lo reportado en [8] el sistema de fracturas de la región tendría una distribución compuesta por planos horizontales.

Referencias

- [1] M. Buforn, E., Métodos para la determinación del mecanismo focal de los terremotos, Departamento de Geofísica, Universidad Complutense de Madrid, 1994.
- [2] Bustamante M., Determinación de la geometría de la zona de Wadati-Benioff en la región del Perú, usando datos de una red sísmica local. Facultad de geología, geofísica y minas, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, 2016.
- [3] Christeson, G.L., Mann, P., Escalona, A., Aitken, T.J., 2008., Crustal structure of the Caribbean-northeastern South America arc-continent collision zone. *Geophysical Research* 113, B08104, 2008.
- [4] Cortes, M., Angelier, J., Current states of stress in the northern Andes as indicated by focal mechanisms of earthquakes, *Tectonophysics* 403, 29-58, 2005.
- [5] Cronin, V.S., A primer on focal mechanism solutions for geologists, Science Education Resource Center, Carleton College, Baylor University, 2010.
- [6] Higgs, R., Caribbean-South America oblique collision model revised. *Society of London Special Publication* 328, 613-657, 2009.
- [7] Pennington, W.D., Mooney, W.D., van Hissenhoven, R., Meyer, H., Ramirez, J.E., Meyer, R.P., Results of a reconnaissance microearthquake survey of Bucaramanga. *Geophysical Research Letters* 6, 65-68, 1979.
- [8] Pindell, J.L., Kennan, L., 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, 2009.
- [9] Prieto G. et al., Earthquake nests as natural laboratories for the study of intermediate-depth earthquake mechanics. *Elsevier Journal, Tectonophysics* 570-571, 42-56, 2012.
- [10] Salcedo, E., y Pérez J.L., Caracterización sismotectónica de la región del Valle del Cauca y zonas aledañas a partir de mecanismos focales de terremotos. *Boletín de Geología*, 38(3): 89-107, 2016.
- [11] Snoke, J. A., J. W. Munsey, A. C. Teague, and G. A. Bollinger., A program for focal mechanism determination by combined use of polarity and SV -P amplitude ratio data. *Earthquake Notes*, 55, 3-15, 1984.
- [12] Stein S., y Wysession M., An Introduction to Seismology Earthquakes and Earth Structure. Department of Geological Sciences, Northwestern University, 2003.
- [13] Suter, F., Sartori, M., Neuwerth, R., Gorin, G., Structural imprints at the front of the Choco-Panama indenter, *Tectonophysics* 460, 134-157, 2008.
- [14] Taboada, A., Rivera, L.A., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Philip, H., Bijwaard, H., Olaya, J., Rivera, C., Geodynamics of the northern Andes: subductions and intracontinental deformation (Colombia). *Tectonics* 19 (5), 787-813, 2000.
- [15] Udías, A., Principles of Seismology. Universidad Complutense de Madrid, Primera edición, 1999.
- [16] Udías A., Muñoz D., Buforn E., Mecanismo de los terremotos y tectónica. Universidad Complutense de Madrid, Primera edición, 1985.
- [17] Van der Hilst, R., Mann, P., Tectonic implications of tomographic images of subducted lithosphere beneath northwestern South America. *Geology* 22, 451-454, 1994.
- [18] Zarifi, Z., Havskov, J., Hanyga, A., An insight into the Bucaramanga nest. *Tectonophysics* 443, 93-105, 2007.