

# Caracterización y recurrencia sísmica del nido de Bucaramanga

Artículo resultado de investigación

---

**Néstor Rafael Perico-Martínez**

Universidad de los Andes  
nestor.perico@uptc.edu.co

---

**Néstor Rafael Perico-Granados**

Universidad Santo Tomás, seccional Tunja  
nestor.perico@usantoto.edu.co

Recibido: octubre del 2014  
Aprobado: febrero del 2015

## Resumen

En el presente trabajo se calcula la recurrencia sísmica del nido de Bucaramanga a partir del análisis de los eventos sísmicos de la zona ocurridos entre mayo del 2012 y febrero del 2013. Dicho análisis se llevó a cabo mediante el método probabilístico de sismogramas sintéticos, que se complementó con un método determinista para estimar la energía liberada. Asimismo, se logró la caracterización de la zona conocida como *nido sísmico de Bucaramanga*, y a la vez que se delimita un área con características similares, se determina la densidad de planos de falla acumulados y se denota la alta actividad sísmica de la zona.

**Palabras clave:** nido de Bucaramanga, sismogramas sintéticos, energía liberada.

## Abstract

In this paper the seismic recurrence of the Bucaramanga Seismic Nest is calculated from the analysis of seismic events in the area between May 2012 and February 2013. This analysis was carried out using the probabilistic method of synthetic seismograms complemented with a deterministic method to estimate the energy released. Also, the characterization of the area known as the “Bucaramanga Seismic Nest” was achieved. Finally, the area is delimited with similar characteristics, the density of accumulated fault planes is determined and the high seismic activity in the area is denoted

**Keywords:** Bucaramanga Seismic nest, synthetic seismograms, energy released.

## 1. Introducción

El territorio colombiano se ha venido forjando por las fuerzas de la naturaleza. En lo concerniente a sus relieves, es indispensable observar el papel que han desempeñado las placas tectónicas de Cocos, Nazca, Sudamericana y El Caribe. Esta dinámica ha hecho que este territorio sea un lugar en constante actividad sísmica, como es el caso del nido sísmico de Bucaramanga, un lugar de alta amenaza sísmica, según la última norma de sismorresistencia de Colombia de 2010 (NSR-10) (Congreso de la República, 2010).

Este proyecto pretende ser una herramienta útil para elaborar proyectos de microzonificación sísmica de la zona, que sirva para complementar los espectros de aceleración y, por ende, permitir la elaboración de infraestructura más compleja en la región noreste de Colombia.

Para llevar a cabo este proyecto, fue necesaria la interrelación de diversas áreas del conocimiento, con el fin de abarcar el fenómeno desde diversas perspectivas. De esta manera, la geología, la física y las matemáticas fueron los pilares para elaborarlo. Más tarde, mediante un análisis de las ondas sísmicas, se obtuvieron los mecanismos focales de la fuente, de tal manera que pudiera conocerse tanto la forma en que se libera la energía como su magnitud, en función de observar así su evolución.

El resultado de este trabajo permite ampliar el conocimiento de las fuentes sismogénicas de la zona y hace posible su aplicabilidad a la hora de realizar los diseños estructurales. Asimismo, abre un camino para futuros trabajos en el área de los mecanismos focales en el país y otros estudios para mejorar los mapas de amenaza sísmica, los cuales puede ser complementarios a los de microzonificación de la región.

## 2. Metodología y análisis de resultados

En primer lugar se delimitó la zona de estudio, de donde se seleccionaron los eventos sísmicos asociados a una fuente sismogénica. Enseguida, dichos eventos se relocalizaron, para luego llevar a cabo su proceso de filtrado, quitando los efectos del medio y demás alteraciones adquiridas en el trayecto. Así, en el programa Isola se pudo

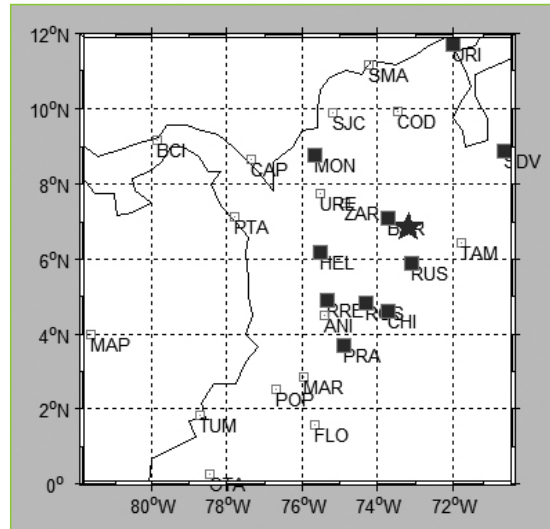
ingresar la información asociada únicamente a la fuente. Este programa permitió determinar los parámetros de la “falla”, asociando un mecanismo focal a cada evento, lo cual permite caracterizar la fuente. Por último, se asocia la energía correspondiente a los eventos sísmicos, a la vez que se observa la evolución de dicha liberación de energía.

### 2.1 Recopilación de datos

El proyecto comenzó con la definición de la zona conocida como nido de Bucaramanga, que corresponde a los sismos de la zona de Santander que tienen su origen a profundidades mayores a los 120 km. De esta manera, se llevó a cabo una recopilación de todo el registro sísmico de la zona comprendida entre las latitudes 6° N y 8° N, las longitudes 72° W y 74° W, y con profundidades superiores a la mencionada. Esta selección se llevó a cabo sobre la base de datos Seisan, en el Servicio Geológico Colombiano (antes Ingeominas), que tiene datos digitales desde 1993.

Luego de este proceso se elaboró un estudio de las estaciones en las que se observan los eventos de dicha zona. De esta manera se seleccionaron las estaciones sismológicas de banda ancha cercanas a la zona y con mayor estabilidad para trabajar: Uribia, Montería, Helena, Barrancabermeja, Rusia, Chingaza, Refugio, Rosal y Prado. Sin embargo, dado que a que casi todas las estaciones se encuentran al oeste de la zona de análisis, se vinculó una estación sismológica de Venezuela (SDV) (figura 1).

La primera alternativa era obtener los mecanismos focales mediante la Stereonet, pero debido a que en los comienzos del funcionamiento de la Red Sismológica de Colombia (RSNC) se poseían muy pocas estaciones, todas estaban al oeste de la zona de estudio y no se tenía información de la estación de SDV en ese entonces, la información es insuficiente y además sesgada.

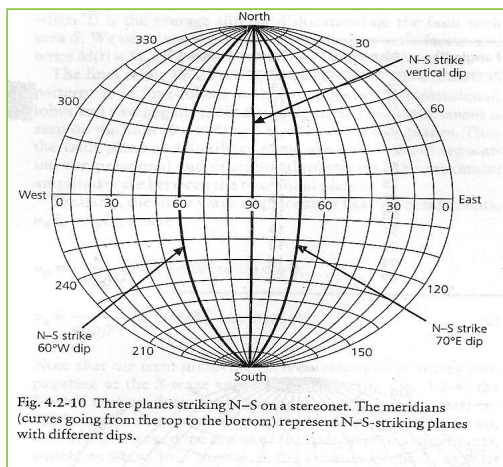


**Figura 1.** Mapa de las estaciones sismológicas de la Red Sismología de Colombia

*Fuente: autores mediante programa Isola.*

Según lo anterior, se comenzaron a buscar otros métodos, y luego de un exhaustivo análisis se llega al de la generación de sismogramas sintéticos, que básicamente consiste en simular una fuente sísmogénica bajo diversos parámetros, los cuales se cambian paulatinamente hasta obtener un sismograma que se ajuste bien al observado (figura 2).

Este método involucraba el uso de estaciones de banda ancha exclusivamente, por lo cual solo serían útiles los eventos registrados a partir del 2000, fecha en la que se instalaron dichos equipos. Pero cuando llegó el momento de pedir la información de las estaciones a la RSNC, se observó que en 2010, 2011 y 2012 se realizaron cambios en dichas estaciones: un estudio les había revelado la mala polarización y orientación. Así, quedó un intervalo de un año para el estudio de los registros sísmicos, que va desde mayo de 2012 hasta febrero de 2013.



**Figura 2.** Modelo Stereonet

*Fuente: Stein y Wysession (2003).*

Es esencial anotar que tan solo sismos de magnitudes mayores a cuatro se observan en la totalidad de las estaciones previamente mencionadas, motivo por el que se tienen 27 registros para analizar. Para el caso, véanse las figuras 3 y 4, y la tabla 1.

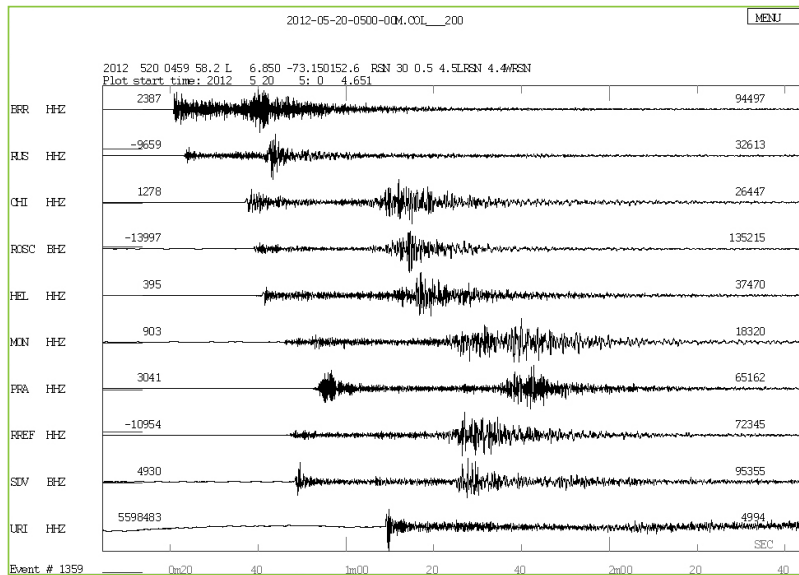


Figura 3. Arribo del sismo del 20 de mayo de 2012

Fuente: autores mediante programa Seisan.

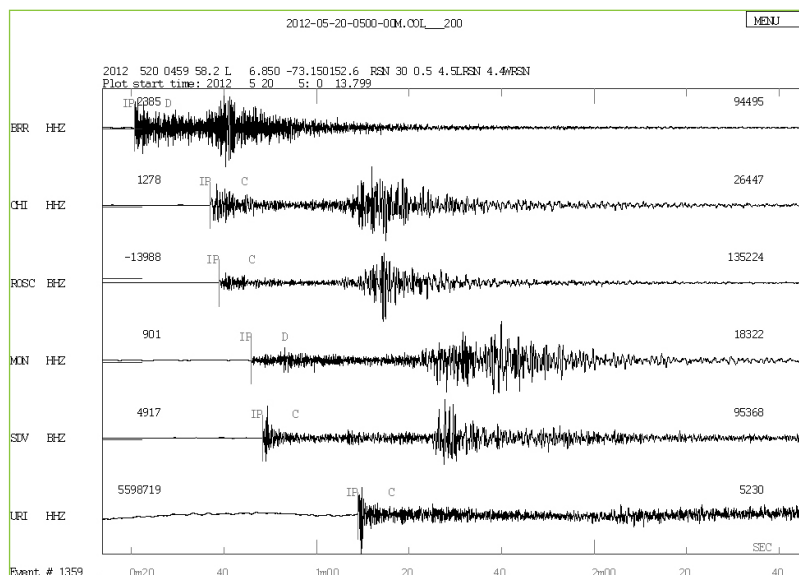


Figura 4. Localización de las fases impulsivas o polarizaciones del evento del 20 de mayo de 2012

Fuente: autores mediante programa Seisan.

Tabla 1. Eventos sísmicos (05/2012-02/2013)

Nº	Fecha	Tiempo de origen (UTC)	Latitud	Longitud	Profundidad (km)	MI
1	20/05/2012	4:59:58	6,850	-73,150	152,6	4,5
2	24/05/2012	18:49:40	6,824	-73,183	148,4	4,4
3	02/06/2012	8:06:53	6,824	-73,165	149,1	4,0
4	10/06/2012	15:21:41	6,820	-73,119	146,0	4,0
5	15/06/2012	6:59:21	6,803	-73,146	150,6	4,1
6	08/07/2012	11:15:02	6,800	-73,144	152,7	4,1
7	18/07/2012	17:23:09	6,794	-73,135	152,0	4,0
8	30/07/2012	10:18:56	6,818	-73,143	154,0	4,3
9	17/08/2012	19:38:18	6,774	-73,152	144,0	4,0
10	20/08/2012	13:00:31	6,809	-73,154	146,8	4,1
11	28/08/2012	22:04:03	6,808	-73,156	144,0	4,4
12	01/09/2012	5:09:46	6,825	-73,158	154,0	5,3
13	10/09/2012	14:43:02	6,786	-73,155	149,0	4,1
14	26/09/2012	2:22:25	6,828	-73,142	147,6	4,1
15	20/10/2012	21:51:11	6,818	-73,136	150,2	4,4
16	24/10/2012	10:20:09	6,800	-73,145	148,0	4,2
17	30/10/2012	12:18:21	6,828	-73,130	144,0	4,5
18	31/10/2012	2:57:39	6,820	-73,137	148,7	4,1
19	05/11/2012	16:46:01	6,821	-73,139	145,4	4,8
20	25/11/2012	22:24:08	6,824	-73,161	152,0	4,4
21	11/12/2012	14:02:30	6,815	-73,148	150,4	4,2
22	13/12/2012	10:05:22	6,797	-73,134	150,3	4,0
23	19/12/2012	0:23:30	6,826	-73,158	147,0	4,3
24	19/12/2012	19:51:09	6,813	-73,151	152,1	4,1
25	24/12/2012	6:41:14	6,835	-73,092	149,9	4,4
26	02/01/2013	4:42:46	6,831	-73,135	149,5	4,1
27	08/01/2013	17:00:53	6,855	-73,119	150,2	4,4

Fuente: Red Sismológica Nacional de Colombia.

El primer análisis que se llevó a cabo frente a los eventos sísmicos consiste en la relocalización de estos, haciendo énfasis en la polarización de la onda *P*, para saber si es compresiva (*C*) o

distensiva (*D*). Así se selecciona la estación por analizar, a la cual se le abre una ventana más grande con el fin de visualizar si su arribo es compresivo o distensivo (figura 5).

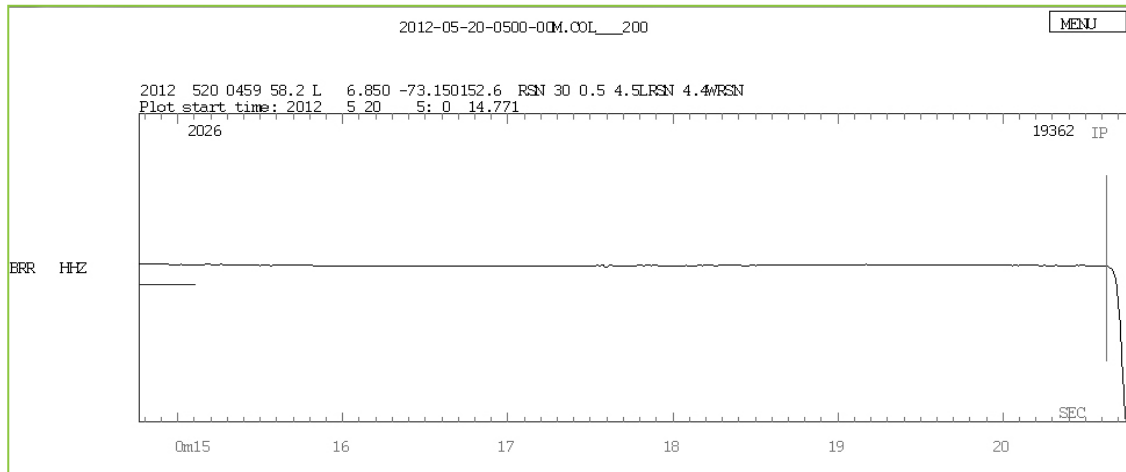


Figura 5. Fase impulsiva distensiva en la estación de BRR, evento del 20 de mayo de 2012

Fuente: autores mediante programa Seisan.

## 2.2 Caracterización

La caracterización del evento sísmico principal (magnitud local mayor a cuatro) del nido de Bucaramanga se llevó a cabo mediante el análisis de las señales sísmicas, en dos etapas:

- Mediante la localización, magnitud y profundidad del evento sísmico.
- A partir de los tiempos de arribo de las ondas *P* y *S*, para determinar el mecanismo focal de cada evento, lo que permitirá conocer el área de estudio (tabla 2).

Tabla 2. Relocalización de arribos de las ondas *P* en eventos sísmicos

Nº	Fecha	MON	BRR	HEL	RREF	ROSC	PRA	CHI	RUS	SDV	URI
1	20/05/2012	D	D			C		C		C	C
2	24/05/2012	D				D		D	D	C	
3	02/06/2012								D		
4	10/06/2012					D			D		
5	15/06/2012	D				C		C	C		
6	08/07/2012		C			C			D		
7	18/07/2012		C			D		D	D	C	
8	30/07/2012		C			D		D	D		
9	17/08/2012		C			D			D		
10	20/08/2012		C			C		C	C	D	
11	28/08/2012	C	D			D		D	C	D	D
12	01/09/2012	D	D	D		C	C	C	C	D	C
13	10/09/2012		C						D	D	



Nº	Fecha	MON	BRR	HEL	RREF	ROSC	PRA	CHI	RUS	SDV	URI
14	26/09/2012		C			C		C	C	D	
15	20/10/2012	D	D			D		D	D		C
16	24/10/2012		D			C		C	D		
17	30/10/2012		C			C		C	C	D	
18	31/10/2012	D	C			C		C	C	D	
19	05/11/2012	D	C			C		C	D	C	C
20	25/11/2012	D				C		C	D		
21	11/12/2012		C			D		D	D		
22	13/12/2012		C			D		D	D		
23	19/12/2012	D	C			C		C	C		
24	19/12/2012		D			C		C	D		
25	24/12/2012	C	C			D		D	D	D	
26	02/01/2013	C	D			C		C	C		
27	08/01/2013		C			D		D	C	D	

Fuente: autores.

### 2.3 Determinación mecanismos focales

Como se había mencionado, la obtención de los mecanismos focales se lleva a cabo a través del método de sismogramas sintéticos, para lo cual se empleó el programa Isola (figura 6).

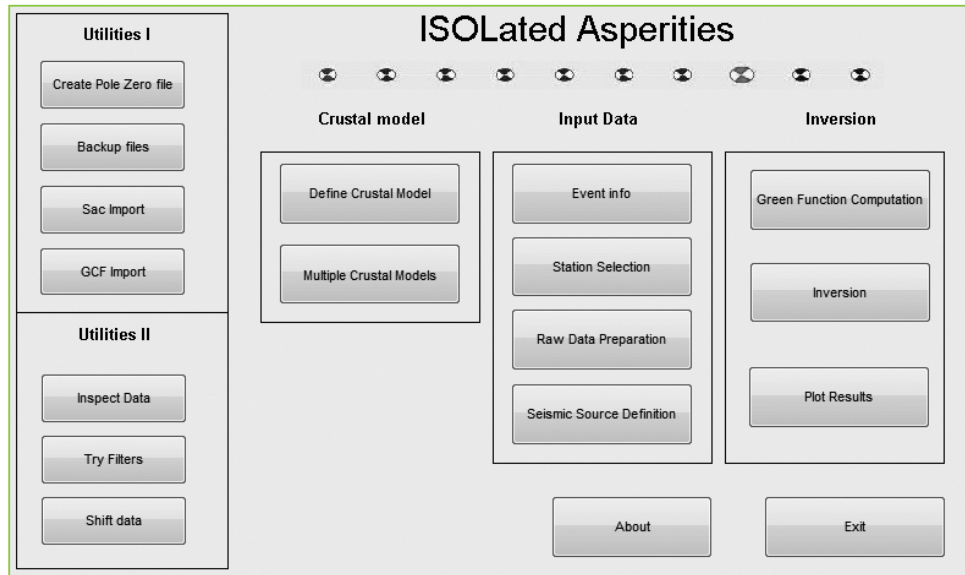


Figura 6. Menú del programa Isola

Fuente: autores.



El programa exige que los datos sean ingresados como archivos .SAC; por ello, previamente se han convertido todas las señales a este tipo de archivo. Una vez escogido el evento sísmico por simular, se comienza a cargar las señales observadas en las diez estaciones seleccionadas. Para cada estación se carga la señal norte-sur (NS), este-

oeste (EW) y zenit-nadir (ZN). Posteriormente se introduce el modelo de velocidades para los distintos estratos de la zona, y más tarde se carga la información del evento, lo cual incluye la localización (latitud, longitud y profundidad), el tiempo de origen y la duración de este (figura 7).

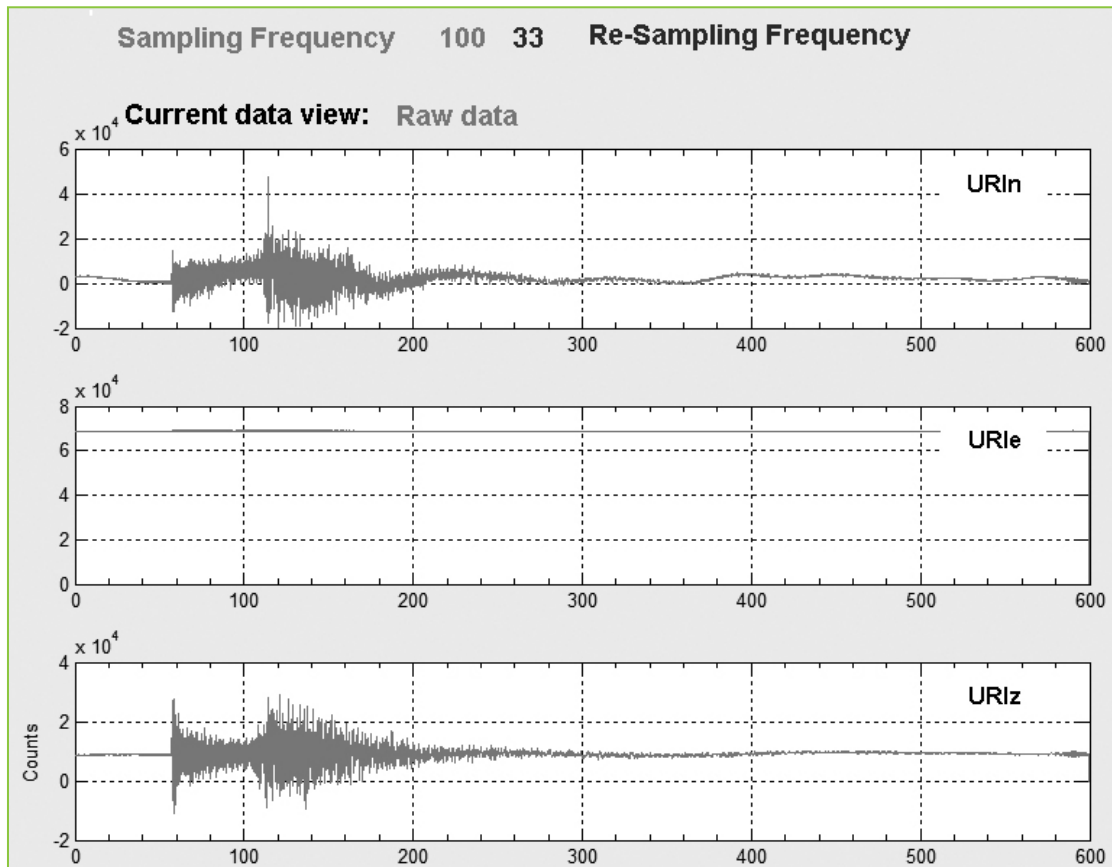


Figura 7. Señal sísmica observada en la estación URI con sus tres componentes (programa Isola)

Fuente: autores.

De esta manera se procede a cargar el archivo de las estaciones sismológicas, el cual incluye su localización geográfica como su respuesta

instrumental. Ahí mismo se seleccionan las estaciones por simular, como aparece en la figura 8.

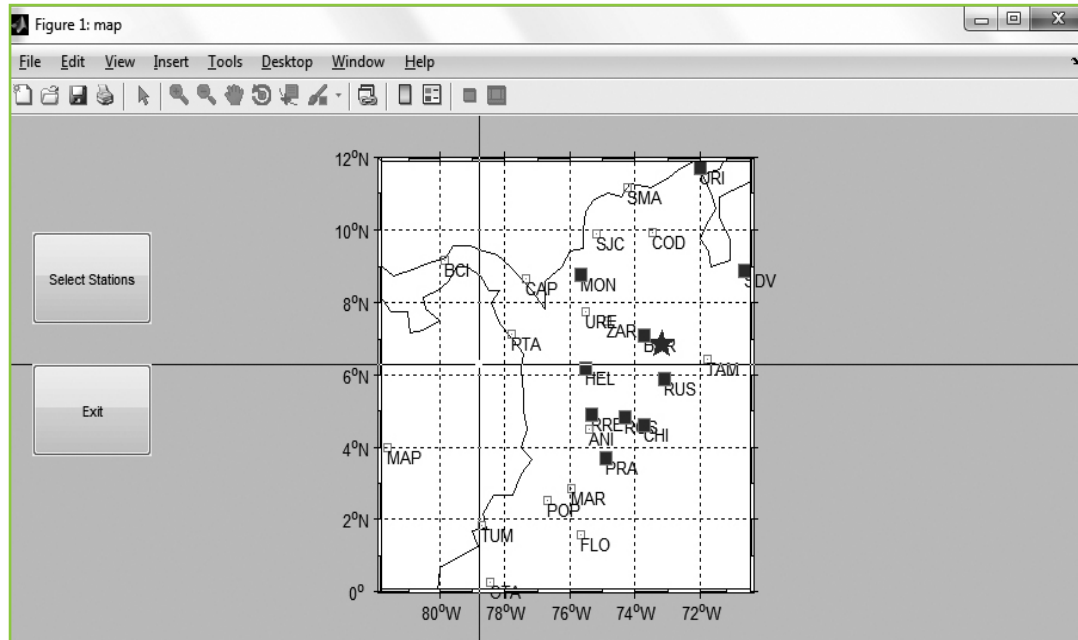


Figura 8. Selección de estaciones sísmológicas por analizar en el programa Isola

Fuente: autores.

Una vez seleccionados los datos, estos se deben deconvolucionar, con el fin de trabajar únicamente con la información proveniente de la fuente sísmica. Se quitan así los efectos del medio y la respuesta instrumental (figuras 9, 10 y 11).

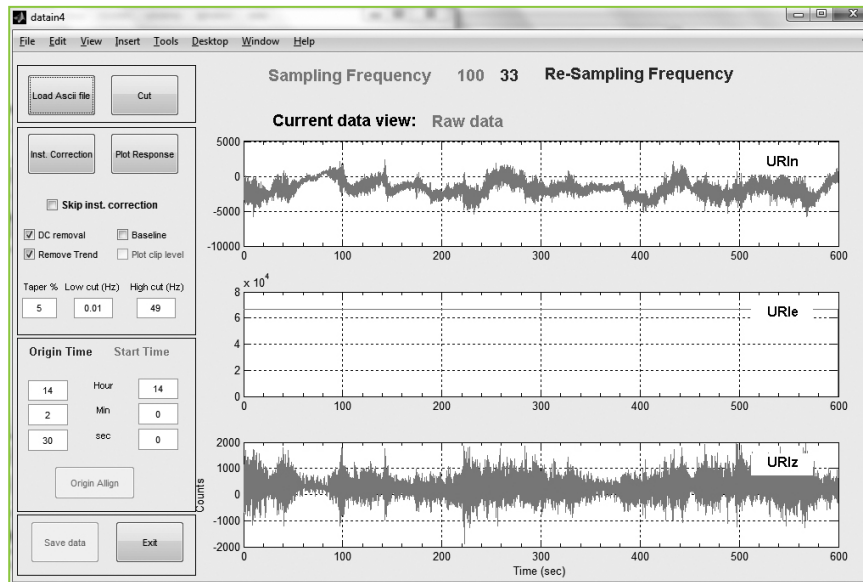


Figura 9. Registro de una señal en la estación de URI observada en el programa Isola

Fuente: autores.

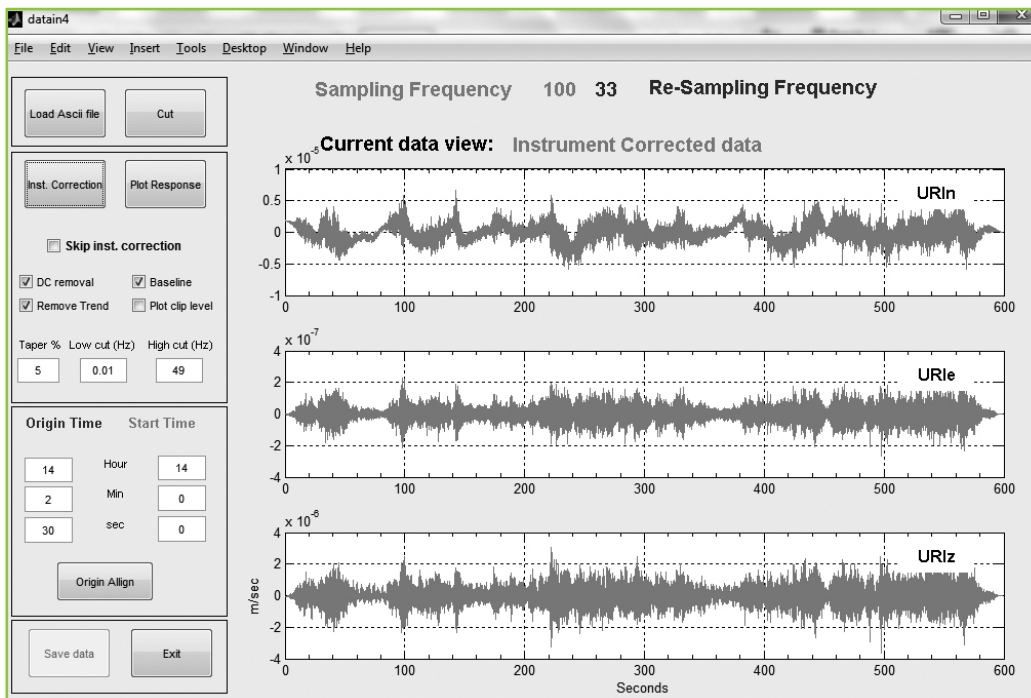


Figura 10. Corrección instrumental a la señal de la figura 29 en el programa Isola

Fuente: autores.

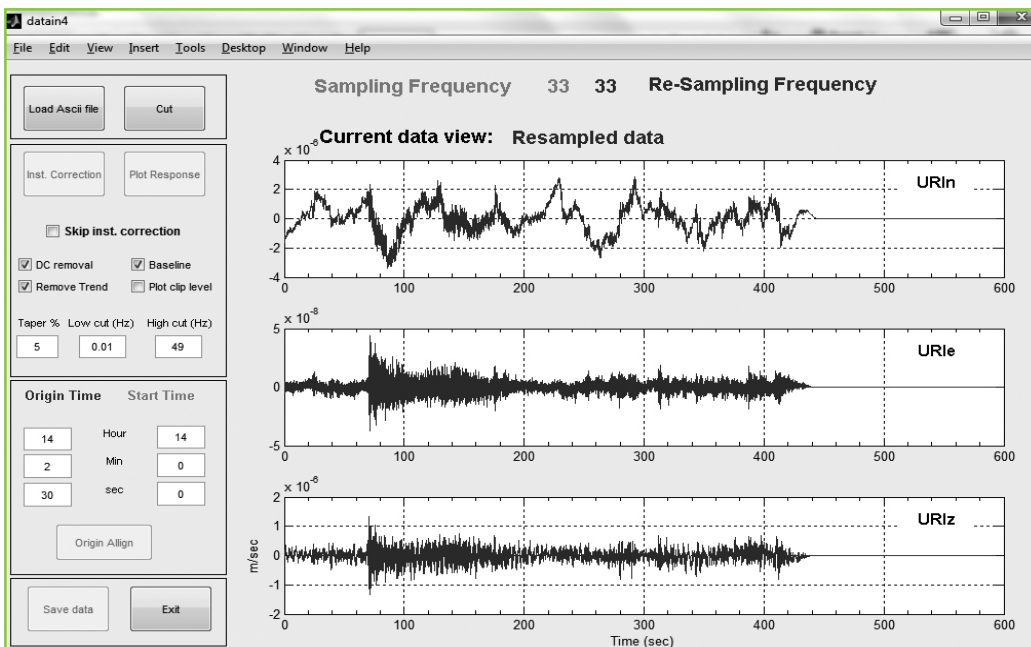


Figura 11. Filtrado a la señal de la figura 30 en el programa Isola

Fuente: autores.

Por último, se ubican las fuentes sísmicas de prueba, como se ve en la figura 12.

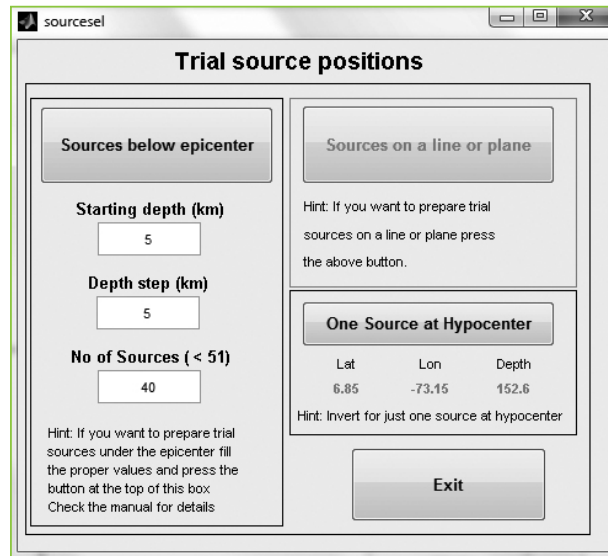


Figura 12. Localización de las fuentes de prueba en el programa Isola

Fuente: autores.

Para el presente caso, son 40 fuentes ubicadas cada 5 km, desde una profundidad de 5 km hasta los 200 km, de tal manera que se abarque la región donde se ubican las fuentes del nido de Bucaramanga. Se procede así a generar las funciones de Green y su inversión, para obtener los sismogramas sintéticos. Este proceso se puede apreciar en la figura 13.

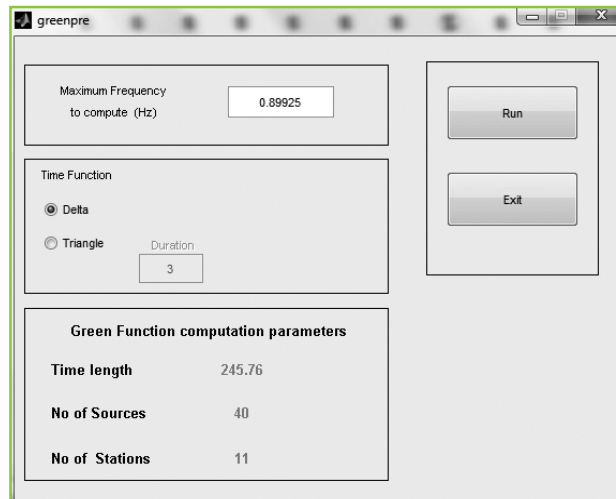


Figura 13. Generación de las funciones de Green en el programa Isola

Fuente: autores.

De esta manera, el programa selecciona la fuente de prueba con menor reducción de varianza, cuya información se conoce bien en cuanto a los parámetros focales. Así se obtienen el acimut, el buzamiento y el desplazamiento correspondientes (figura 14).

```

VOL4          0
DC4           85.3
CLVD4        14.7
Variance reduction from the used stations only 0.4512 % 45.12
Variance reduction from all stations          0.4512 % 45.12

Src1 Dip1 Rake1
 140  79  -30
Src2 Dip2 Rake2
 236  61  -147

P-axis Azimuth Plunge
      94      29
T-axis Azimuth Plunge
      191     12

Mxx Mxy Mxf Myx Myy Myz Mzx Myz Mzz
-7.2507e+14  28.6253e+14 -21.5747e+14 -5.9421e+14  12.7627e+14 -7.6226e+14

          Stations-Components Used
Station   NS    EW    Ver
BRR      +    +    +
RDS      +    +    +
HEL      +    +    +
SDV      +    +    +
    
```

Figura 14. Parámetros focales del sismograma sintético generado en el programa Isola

Fuente: adaptación de los autores mediante el programa Isola.

Con base en ello se puede graficar la esfera focal, como se observa en la figura 15.

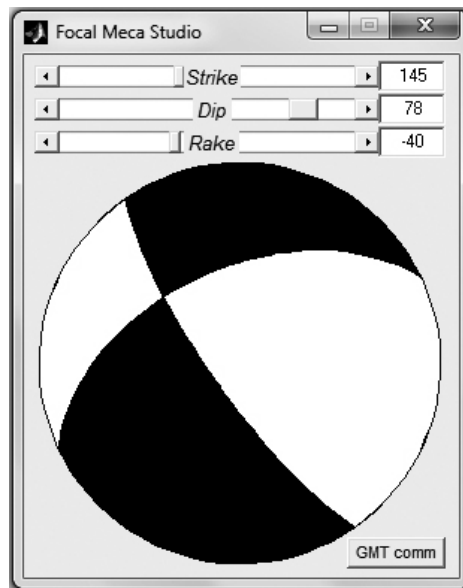


Figura 15. Esfera focal correspondiente a los parámetros obtenidos en el programa Isola

Fuente: adaptación de los autores mediante el programa Mirone.

Se obtiene así el mecanismo focal de los 27 eventos sísmicos (figura 16).

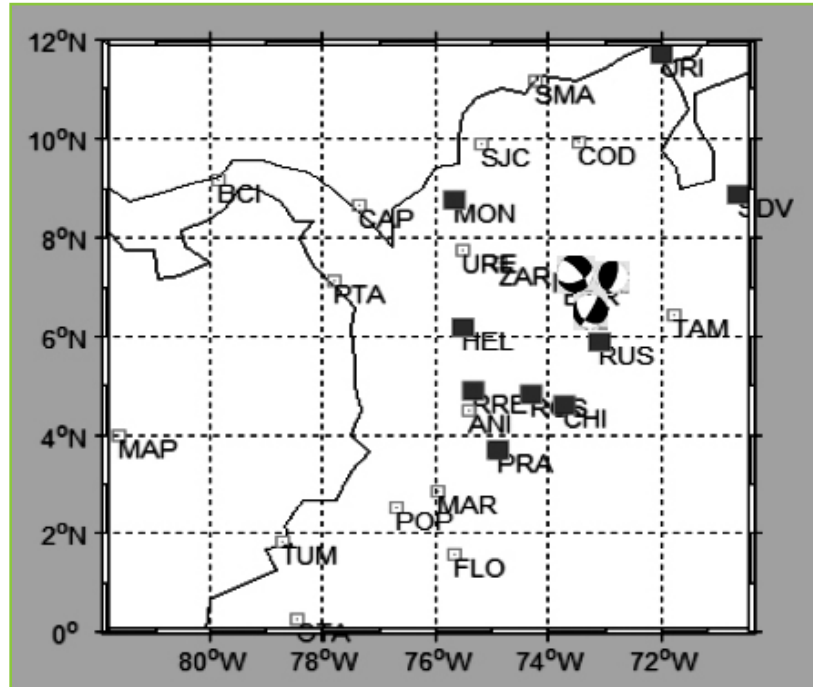


Figura 16. Visualización de algunos de los mecanismos focales

Fuente: adaptación de los autores mediante el programa Isola.

De esta manera se procede a caracterizar la falla con base en el ángulo de desplazamiento.

## 2.4 Recurrencia

Finalmente, se observa que existen unos ciclos de acumulación de energía, pues en la evolución de la fuente sismogénica se evidencia la forma como van aumentando los sismos cuyo mecanismo pertenecen a una falla lateral izquierda cada vez que comienza un nuevo ciclo con una liberación de energía por una falla lateral derecha. Con base en lo anterior se procede a calcular la energía liberada ( $E$ ) en cada evento sísmico, su momento sísmico ( $M_0$ ) y el área de falla ( $S$ ). Así, según Gutenberg y Richter (1956) se tiene:

$$\log E = 5,8 + 2,4M$$

Según Hanks y Kanamori, en 1979, [26]

$$M = \frac{2}{3}(\log M_0) - 10,7$$

$$M_0 = k\lambda S$$

$$k = 3 * 10^{11}$$

Luego se lleva a cabo la correlación de las energías en cada ciclo en el programa Arena (figura 17).

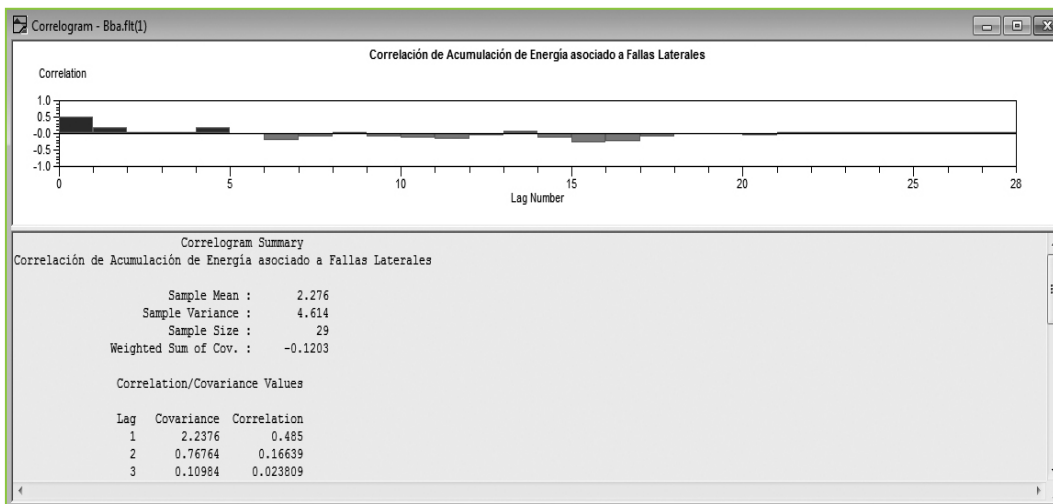


Figura 17. Correlación entre los desplazamientos a la izquierda y a la derecha

Fuente: adaptación de los autores mediante el programa Arena.

De acuerdo con la figura anterior, se observa que hay una autocorrelación en la energía acumulada y liberada en la zona del nido sísmico, ya que el coeficiente de correlación da positivo, con de magnitud 0,485. Finalmente, se percibe que todos los eventos sísmicos seleccionados pertenecen a fallas normales, por lo que se puede caracterizar la zona del nido sísmico de Bucaramanga gracias a los eventos sísmicos entre las latitudes 6,774 y 6,855 y las longitudes -73,092 y -73,183.

$$\Delta \text{ Latitudes} = 0,81^{\circ}$$

$$\Delta \text{ Longitudes} = 0,091^{\circ}$$

$$A = (0,081^{\circ} * 0,091^{\circ}) = 0,07371^{\circ} = 91 \text{ km}^2$$

De esta manera, se puede establecer un área de 91 km<sup>2</sup> para la zona del nido sísmico de Bucaramanga.

### 3. Conclusiones

Todas las esferas focales corresponden a fallas normales, pues el buzamiento del plano está entre 0° y 90°. El 81% de los eventos corresponden a fallas laterales izquierdas, por lo que la

preponderancia de estos desplazamientos indica una acumulación de energía en este sentido, la cual es liberada mediante los eventos sísmicos correspondientes a fallas laterales derechas, y así se determinan ciclos de acumulación.

Los análisis realizados a los eventos sísmicos no solo permitieron su caracterización, sino que además permiten observar que se encuentran concentrados dentro de una zona con una extensión de 91 km<sup>2</sup> vista en planta, donde además se determinaron áreas de falla acumuladas en el 10% de su superficie. Se denota así su alta actividad sísmica y es posible definir la zona del nido sísmico de Bucaramanga.

De acuerdo con lo observado en el correlograma, el cual corresponde a la autocorrelación de la acumulación de energía asociada a fallas laterales, se determinó que existe una correlación positiva de magnitud 0,485 entre la acumulación de energía en las fallas laterales izquierdas y su posterior liberación en las fallas laterales derechas, lo cual se puede explicar por los pocos ciclos que se generan en este periodo de análisis. Aunque se observan pocos ciclos de acumulación de energía, es importante resaltar que ante eventos sísmicos de gran energía, magnitudes



superiores a cinco, como el evento registrado el primero de septiembre del año 2012, hacen que los ciclos sean más cortos.

#### 4. Recomendaciones

Los datos disponibles aún son escasos, lo cual impide elaborar un modelo de mayor precisión para inferir la magnitud de la energía en los ciclos de acumulación. Entonces, se recomienda hacer estudios complementarios que permitan engrosar los conocimientos acerca de la zona y así observar si mejora la correlación.

#### 5. Referencias

- Buforn, E. y Pro, Carmen (2006). Mecanismo focal y sismotectónica. aportación de Agustín Udías. *Física de la Tierra*, 18, 11-23.
- Casella, G. y Berger, R. (2002). *Statistical inference* (2.ª ed.). Pacific Grove: Thomson Learning.
- Chen, Y., Zhou, R. y Wu, Z. (1999). Moment tensor inversion for focal mechanism of the Beibuwan earthquakes. *Acta Seismologica Sinica*, 12(6), 609-617.
- Congreso de la República, Asociación de Ingeniería Sísmica (2010). *Norma Sismo Resistente Colombiana NSR-10*. Bogotá: Autor.
- Guttenberg, B. y Richter, C. F. (1956). Magnitude and energy of earthquakes. *Annali di Geofisica*, 9, 1-15.
- Grupo Quimbaya y CEIFI (2014). *Tasas de recurrencia sísmica en la zona central de los andes colombianos a partir de la completitud del catálogo hasta el año 2004*. Arenia: Universidad del Quindío.
- Hanks, T. C. y Kanamori, H. (1979). A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research*, 84, 23480-23500.
- Helmstetter, A. y Jackson, D. (2005). *Importance of small earthquakes for stress transfers and earthquake triggering*, *J. Geophys.*
- Sistema Geológico de Colombia (s. f.). Formulario de consulta externa de sismos. Recuperado de <http://goo.gl/syKpTI>
- Lehmann, E. L. (2005). *Testing Statistical Hypotheses* (3.ª ed.). Nueva York: Springer.
- Parsons, T. y Velasco, A. A. (2011). Absence of remotely triggered large earthquakes beyond the mainshock region. *Nat Geosci*, 4, 312-316.
- Seyrek, E., y Tosun, H. (2011). Deterministic approach to the seismic hazard of dam sites in Kızılırmak basin, Turkey. *Natural Hazards*, 59(2): 787-800.
- Stein, S. y Wysession, M. (2003). *An introduction to seismology, earthquakes, and Earth structure*. Hong Kong: Graphicraft Limitada.
- Wald, D. J. et al. (1999). TriNet "ShakeMaps": rapid generation of peak ground motion and intensity maps in California. *Earthquake Spectra*, 15, 537-556.
- Wells, D. L., y Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture area and surface displacement. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84(4), 974-1002.
- Wiemer, S. (2000). Introducing probabilistic aftershock hazard mapping. *Geophysical Research Letters*, 27(20), 3405-3408.