

Análisis espectral del sismo del 27 de agosto de 2013 ocurrido en el Valle del Cauca, Colombia

Lina Vanessa Girón-Lozano¹; Elkin de Jesús Salcedo-Hurtado^{1,2*}; Germán Pérez-Alcázar³

doi: <https://doi.org/10.18273/revbol.v42n2-2020003>

Forma de citar: Girón-Lozano, L.V.; Salcedo-Hurtado, E.J.; Pérez-Alcázar, G. (2020). Análisis espectral del sismo del 27 de agosto de 2013 ocurrido en el Valle del Cauca, Colombia. *Boletín de Geología*, 42(2), 49-67. doi: 10.18273/revbol.v42n2-2020003.

Resumen

Esta investigación determina el contenido frecuencial para el sismo del 27 de agosto de 2013 con epicentro en la cabecera municipal de Restrepo en el departamento del Valle del Cauca, Colombia, registrado por el Servicio Geológico Colombiano y el Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroccidente Colombiano. La etapa de tratamiento comprende el análisis espectral por medio del proceso de deconvolución que depende de la composición instrumental de la estación sismológica, el cálculo del espectrograma que describe la evolución temporal del contenido frecuencial y el rango dinámico en unidades de decibelios (dB) y la transformada de Fourier. Posteriormente, se determina la relación del contenido frecuencial con la geología de la zona donde se ubican las estaciones sismológicas. Se establece que, aunque se describen periodos altos en la señal recibida en cada una de las estaciones, la evolución temporal de las ondas sísmicas muestra que las frecuencias halladas en los espectros de Fourier son variables y dependen de las condiciones geológicas más no de los parámetros instrumentales, de tal manera que los depósitos de suelo se comportan como filtros para la energía de alta frecuencia.

Palabras clave: Sismo; Análisis espectral; Deconvolución; Transformada de Fourier; Espectrograma; Contenido frecuencial.

Spectral analysis of earthquake of august 27, 2013 occurred in the Valley of Cauca, Colombia

Abstract

This research determines the frequency content for the earthquake of august 27, 2013 with an epicenter in the county seat of Restrepo in the department of Valle del Cauca, Colombia, recorded by the Colombian Geological Service and Seismological Observatory and Geophysical Colombian Southwest. The treatment step comprises spectral analysis through the deconvolution process that depends on the composition of the instrumental seismological station, the calculation of the spectrogram that describes the time evolution of the frequency content and dynamic range in units of decibels (dB) and the Fourier transform. Then the ratio of frequency content with the geology of the area where seismic stations are located is determined. It is established that although high periods are described in the signal received in each of the stations, the temporal evolution of the seismic waves shows that the frequencies found in the Fourier spectra are variable and depend on the geological conditions but not on the instrumental parameters, so that soil deposits behave as filters for high frequency energy.

Keywords: Earthquakes; Spectral analysis; Deconvolution; Fourier transform; Spectrogram; Frequency content.

¹Grupo Georiesgos, Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroccidente Colombiano, Universidad del Valle, Cali, Colombia. lina.giron4@gmail.com; (*) elkin.salcedo@correounivalle.edu.co

²Departamento de Geografía, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

³Departamento de Física, Universidad del Valle, Cali, Colombia. german.perez@correounivalle.edu.co

Introducción

El Suroccidente Colombiano es catalogado como una de las zonas de mayor actividad y amenaza sísmica del país (Salgado *et al.*, 2010) por lo cual se encuentra bajo monitoreo permanente a través del Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroccidente (OSSO), que conjuntamente con la Red Sismológica Nacional (RSNC) del Servicio Geológico Colombiano, reporta señales en tiempo real por medio de una red que cubre los cuatro departamentos que se ubican en la región. Estas señales describen el cambio de amplitud y su evolución con respecto al tiempo, pero dentro de esta señal se encuentran ocultas las frecuencias reportadas por las estaciones.

Estas frecuencias brindan ayuda en la interpretación del recorrido de las ondas sísmicas en el interior de la tierra; además, son fundamentales para analizar el comportamiento del suelo en donde se realizan las construcciones, ya que dependiendo del rango frecuencial de resonancia entre la estructura y el comportamiento del suelo ante un evento sísmico, se definen las normas y códigos de construcciones sismorresistentes.

A pesar de la complejidad tectónica de la región del suroccidente colombiano y de la importancia que se tiene de conocer las frecuencias contenidas en las señales de los eventos sísmicos, son pocos los estudios relacionados con los contenidos frecuenciales realizados para esta zona. En el año 2002, se analizaron los registros de eventos sísmicos ocurridos en Colombia entre 1994 y 1996 en dos estaciones sísmicas, una ubicada a 9 kilómetros de Bogotá y la otra en la frontera con Venezuela, utilizando densidades espectrales de potencia para hallar las frecuencias máximas y de esquina, con el fin de analizar el comportamiento de cada fuente (Arévalo-Caro y Alfaro-Castillo, 2002). Sin embargo, en varios países han tomado el dominio de frecuencias para observar comportamientos que se encuentran ocultos en las señales reportadas a tiempo real; es el caso de estudio realizado por Benito y Cabañas, quienes trabajan en el dominio de frecuencias calculando sus magnitudes para la caracterización del movimiento del suelo y observar la perturbación de la

estructura ubicada en una zona determinada (Benito y Cabañas, 1999). Por esto, resulta pertinente estudiar los cambios espectrales de frecuencia en cada una de las estaciones que registran un evento sísmico, mostrando los diferentes contenidos frecuenciales según la composición geológica de la zona donde se ubican dichas estaciones.

El presente trabajo se basa en el análisis del dominio frecuencial utilizando la transformada de Fourier para observar la parte oculta de una señal sismológica, teniendo como objetivo analizar el contenido frecuencial del evento sísmico registrado el 27 de agosto del 2013 en el departamento del Valle del Cauca. Para esto, inicialmente se utiliza el proceso de deconvolución teniendo en cuenta los instrumentos que conforman la estación sismológica para la eliminación de la respuesta instrumental; después se calcula el espectrograma para observar la variación temporal del contenido frecuencial y el rango dinámico en decibelios (dB) observado en estos. Posteriormente, se aplica la transformada de Fourier para observar el comportamiento del contenido frecuencial y su relación con la geología de la zona donde se ubican las estaciones sismológicas.

De esta forma, el trabajo se estructura presentando inicialmente la caracterización física del sismo, luego los aspectos teóricos que sustenta el estudio, posteriormente la metodología y datos utilizados y, por último, se muestran los resultados, su discusión y conclusiones respectivas.

Caracterización del sismo

Parámetros de localización y magnitud

El sismo registrado a las 23:22:04 (hora UTC) con una magnitud de 4,5 M_l y 4,4 M_w a 37,4 km de profundidad, fue sentido en varios municipios del departamento del Valle del Cauca. Su epicentro, en el municipio de Restrepo, se localizó en las coordenadas 3,86 de latitud norte y 79,66 de longitud oeste (Figura 1); por su espacialización podría atribuirse al Sistema de Falla Río Bravo (OSSO, 2013).

contenidos de frecuencias, separándolas y permitiendo visualizar amplitudes asociadas a frecuencias específicas. La representación de una señal en el dominio de frecuencia permite describir muchos rasgos que son difícilmente observados en el dominio del tiempo; por esto, es de gran importancia interpretar una señal a partir de estos dos dominios. Este análisis se ha aplicado constantemente para la determinación de capas, visualización estratigráfica y determinación directa de hidrocarburos (Sierra *et al.*, 2008).

Deconvolución: el filtrado es una característica típica de cualquier sistema que transmita señales y es muy utilizado para extraer rangos de frecuencias no deseables, dependiendo de la investigación. En sismología se aplica generalmente al dominio de frecuencias para extraer información y obtener el movimiento real del terreno (Ordóñez-Piscoya, 2005; Rochal, 2011); por ejemplo, en Cahuari y Tavera (2007) se usó esta técnica para determinar la magnitud ML en registros sísmicos para sismógrafos tipo Wood – Anderson WA. Al conocerse la respuesta instrumental del sismógrafo, es posible realizar la deconvolución de cualquier sismograma (Figueroa-Soto *et al.*, 2010), puesto que

este es la convolución entre la respuesta instrumental del sismógrafo y la velocidad del suelo (Rochal, 2011).

Transformada de Fourier: por su simplicidad y su claro significado físico, la transformada de Fourier (FT) es el método más popular utilizado para el procesamiento de señales en múltiples campos (Yuan y Cai, 2003; Moya, 2009). Se puede aplicar para cualquier problema geofísico, especialmente para señales estacionarias, cuyo espectro no varía con el tiempo. Representa la descomposición de un registro ondulatorio en series de señales sinusoidales, es decir, es capaz de distinguir las diferentes componentes de frecuencia de la señal y sus respectivas amplitudes. Ha sido muy útil para implementar soluciones analíticas y numéricas de ecuaciones diferenciales y para el análisis y tratamiento de señales (Bolzan, 2004).

Metodología

En la Figura 2 se presenta el flujograma de los procesos metodológicos seguidos en el presente trabajo. Para el análisis de los datos se utilizaron los programas SEISAN (Havskov y Ottemöller, 2005) y SAC (2011).

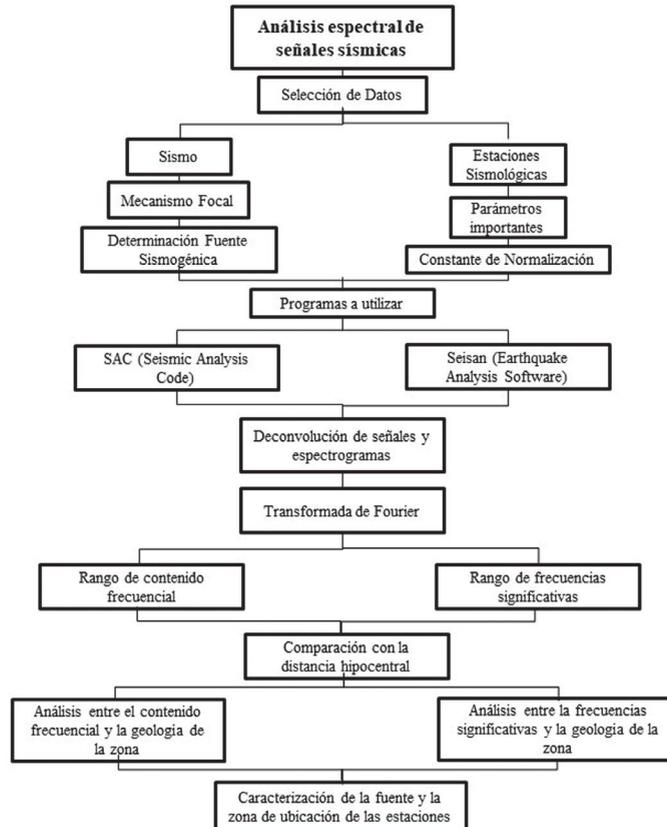


Figura 2. Flujograma de procesos metodológicos.

Parámetros y descripción de los instrumentos utilizados

Los instrumentos instalados en las estaciones que fueron utilizados para este trabajo son descritos en la Tabla 2.

En la Tabla 3 se muestra la ganancia de ambos digitalizadores.

En la Tabla 4 se muestra el instrumento utilizado, su frecuencia natural, su factor de normalización y la sensibilidad de la componente vertical.

Tabla 2. Instrumentos utilizados para este trabajo.

Digitalizadores		Sensores	
Nombre	Descripción	Nombre	Descripción
DM-24	Es un digitalizador multicanal de datos sísmicos adaptable a diferentes formatos. Un DM24 independiente se puede instalar con sensores analógicos existentes o digitales (Güralp Systems, 2009d).	Güralp CMG-3ESP	Sismómetro con tres sensores en una caja sellada que puede medir tres direcciones. La frecuencia natural es 0,033 Hz y sus polos y ceros se definen según su configuración (Güralp Systems, 2009a).
		Güralp CMG-5T	Acelerómetro con tres sensores en una caja sellada que puede medir las tres direcciones, sus polos y ceros son modificables con una frecuencia fundamental de 0,05 Hz (Güralp Systems, 2009b).
		Güralp CMG-3T	Sismómetro con tres sensores en una caja sellada que puede medir tres direcciones. La frecuencia natural es 0,003 Hz y sus polos y ceros se definen según su configuración (Güralp Systems, 2009c).
Q330	Es un avanzado digitalizador de bajo costo y de bajo consumo de energía. Consta de 3 o 6 canales, un receptor de GPS, conversor de energía, control de sensor y un módulo para manejo telemétrico (Havskov y Alguacil, 2004; Kromer, 2006).	Refteck 151-120	Sismómetros con tres sensores que miden simultáneamente las tres direcciones, tiene una respuesta de frecuencia banda ancha y con frecuencia natural de 0,0083 Hz (Toshniwal, 2014).

Tabla 3. Ganancia o sensibilidad de los dos digitalizadores utilizados.

Digitalizador	Ganancia (Count/V)
Güralp DM-24	303030303
Q330	419430

Tabla 4. Parámetros de los instrumentos utilizados.

N°	Estación	Sismómetro o Acelerómetro	Frecuencia Natural (Hz)	Factor normalización A_0	Sensibilidad componente Vertical		
					Magnitud	V/m/s	V/m/s ²
1	FLO2	Guralp CMG 5T	0,05	1,94E+09	1,02		X
2	GCUF	Guralp CMG-3EPS	0,033	2,30E+06	5834		X
3	GUY2C	REFTEK	0,0083	9,02E+07	1994,25		X
4	HEL	Guralp CMG-3EPS	0,033	6,30E+02	2370		X
5	ORTC	REFTEK	0,0083	9,02E+07	1994,25		X
6	POP2	REFTEK	0,0083	9,02E+07	2006,9		X
7	SOTA	Guralp CMG-3T	0,0083	2,30E+06	1490		X
8	TUM	STS-2	0,0083	5,97E+07	1500		X
9	YOT	REFTEK 151	0,0083	9,02E+07	2007,84		X

Deconvolución de sismogramas

La deconvolución de sismogramas es un trabajo fundamental que se realiza para conocer el movimiento real del suelo. Durante el desarrollo de este trabajo se utilizaron datos de sismógrafos o acelerógrafos de diferentes estaciones; el proceso de deconvolución se realizó con ayuda del software Seismic Analysis Code (SAC, 2011).

Espectrograma y Transformada de Fourier en SAC

Al tener deconvolucionada la señal, se procede a obtener el espectrograma para la señal desde una frecuencia mínima hasta una máxima. Un espectrograma se puede definir como un gráfico de intensidad (generalmente en una escala logarítmica, como dB) de la magnitud de la Transformada de Fourier de corto tiempo (STFT). Corresponde a un gráfico tridimensional de amplitud de señal vs tiempo y frecuencia. Por lo general, se calcula utilizando la transformada rápida de Fourier (Smith, 2007). El espectrograma se puede utilizar para analizar los resultados al pasar una señal de prueba a través de un procesador de señales, como un filtro para comprobar su rendimiento, es usado en diversas aplicaciones como: análisis frecuencial de señales audiovisuales, visualización de señales eléctricas y

de comunicaciones, análisis musical, aplicaciones acústicas, aplicaciones sismológicas, análisis de señales biomédicas, extracción de características, entre otras.

Datos

Instrumentación y datos

Para el análisis del contenido frecuencial se realizó una base de datos con las estaciones sismológicas de código HH (banda ancha), que registraron el evento sísmico y que se localizan en el suroccidente colombiano y sus alrededores (Tabla 5). Se debe tener en cuenta que el código del instrumento es muy importante, ya que este indicará el rango de frecuencias filtradas y registradas, por tanto, se escogieron solo estaciones banda ancha debido a que la mayoría de éstas se encuentran con este código facilitando el análisis frecuencial.

Para el evento del 27 de agosto del 2013, se obtuvo errores de localización menores a 10 km en latitud, longitud y profundidad, y un error residual de 0,3 (OSSO, 2013). Se calcularon los contenidos frecuenciales de las diferentes estaciones, hallando la frecuencia máxima (f-máx) por medio de comandos específicos usados en el programa y mediante una observación empírica se determinaron las frecuencias significativas (f-significativas) de cada señal.

Tabla 5. Estaciones utilizadas para el análisis espectral.

Nº	Estación	Nombre	Departamento	Código*	Latitud N (°)	Longitud W (°)
1	FLO2	Florencia	Caquetá	HH	1,6	-75,7
2	GCUF	--	Nariño	HH	1,2	-77,3
3	GUY2C (GUY)	Guyana	Caldas	HH	5,2	-75,4
4	HEL	Helena	Antioquia	HH	6,2	-75,5
5	ORTC	Ortega	Tolima	HH	3,9	-75,2
6	POP2	Popayán	Cauca	HH	2,5	-76,7
7	SOTA	Sotará	Cauca	HH	2,1	-76,6
8	TUM	Tumaco	Nariño	HH	1,8	-78,7
9	YOT	Yotoco	Valle del Cauca	HH	4,0	-73,4

*Código: HH-Banda ancha de 100 Hz

Resultados y discusión

Contenido frecuencial del sismo del 27 de agosto del 2013

Las estaciones que tenían archivos de respuesta completos y se encontraban en funcionamiento el día 27 de agosto fueron utilizadas para el procesamiento de los datos, hallando su contenido frecuencial según

la composición de suelo y su distancia epicentral. En la Tabla 6 se presentan las estaciones que se utilizaron, código, digitalizador y sensor instalados a la fecha.

En la Figura 3 se muestra el espectrograma calculado con el primer arribo de onda, el cual indica la variación de la energía (Rango dinámico) y el contenido frecuencial respecto al tiempo.

Tabla 6. Sensores y digitalizadores utilizados con su fecha de instalación.

Nº	Estación	Nombre	Código*	Fecha de instalación	Modelo Sensor	Modelo Digitalizador
1	FLO2 (CFLO)	Florencia	HH	10/12/2012	Guralp CMG-5T	Q330
2	GCUF	--	HH	2008	Guralp CMG-3ESP	Guralp DM24
3	GUY2C (GUY)	Guyana	HH	15/4/2013	REFTEK 151-120	Q330
4	HEL	Helena	HH	18/6/2011	Guralp CMG-3ESP	Q330
5	ORTC	Ortega	HH	20/6/2013	REFTEK	Q330
6	POP2	Popayán	HH	16/4/2013	REFTEK	Q330
7	SOTA	Sotará	HH	21/7/2010	Guralp CMG-3T	Guralp DM24
8	TUM	Tumaco	HH	5/7/2009	Kinometrics STS-2	Q330
9	YOT	Yotoco	HH	17/10/2012	REFTEK	Q330

*Código: HH-Banda ancha de 100 Hz

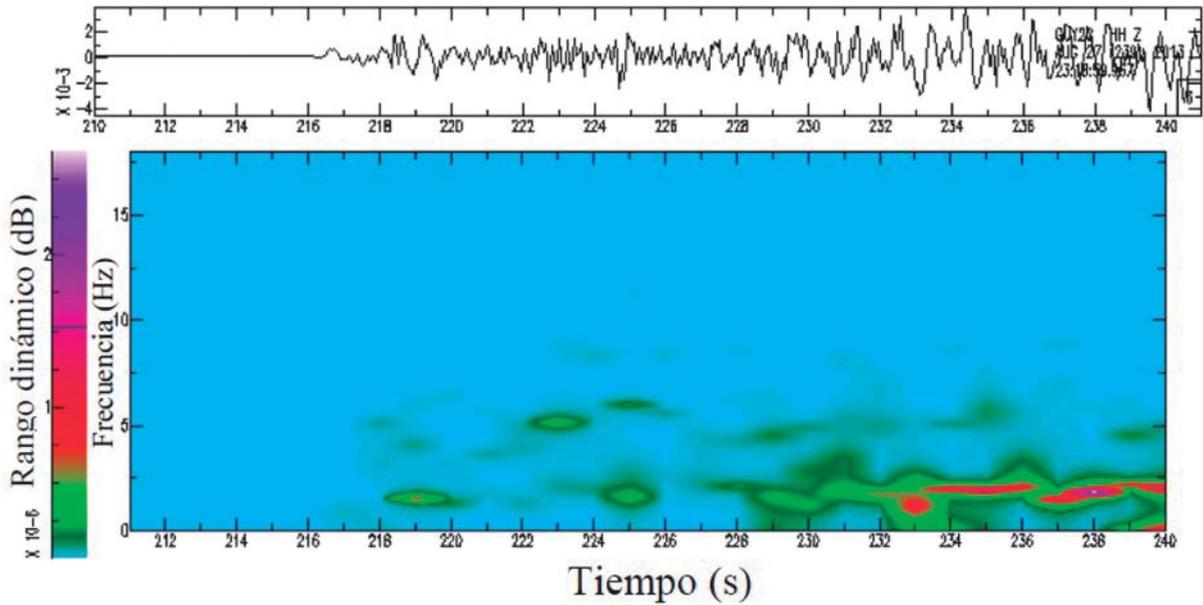


Figura 3. Espectrograma de la estación GUY2C para el evento del 27 de agosto del 2013.

El espectrograma del primer arribo de onda muestra que aproximadamente en 238 segundos a una frecuencia de 2,0 Hz hay un rango dinámico mayor entre 2 y 3 dB (color púrpura), indicando que para el arribo de ondas primarias, durante este intervalo

corto de tiempo se liberó mayor energía. Por último, se aplica la transformada de Fourier, según el procedimiento descrito anteriormente, obteniendo el espectro mostrado en la Figura 4.

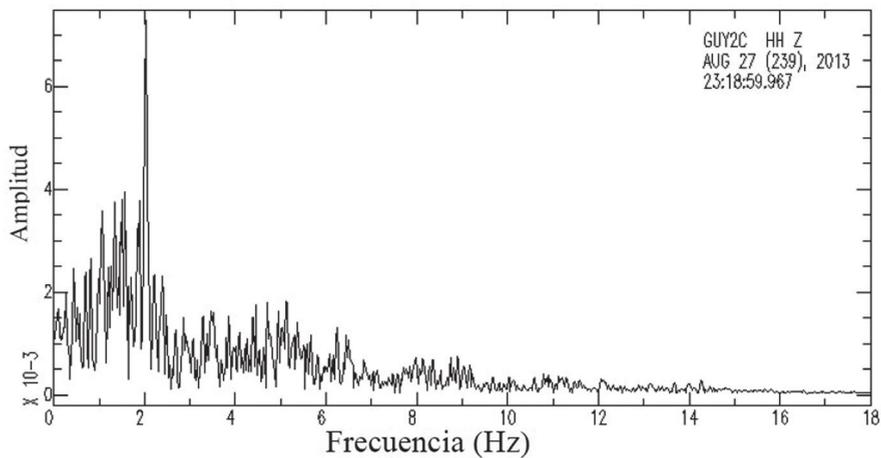


Figura 4. Transformada de Fourier de la estación GUY2C para el evento del 27 de agosto del 2013.

Observando que en la estación de GUY2C hay un contenido frecuencial desde 0 Hz hasta aproximadamente 15 Hz, con un rango de frecuencias altas entre 1 hasta casi 3 Hz, con oscilaciones en la magnitud teniendo variaciones muy tenues pero notables en varios rangos de frecuencias. Estas variaciones se relacionan con el comportamiento del suelo en donde la estación se encuentra localizada, aunque estas variaciones dependen también de otros factores importantes.

Todas las estaciones presentan este comportamiento, pero se puede notar con más claridad en SOTA, la cual se encuentra ubicada en Sotará, sus contenidos son reportados en la Tabla 7. En el Anexo se presenta la gráfica de la transformada de Fourier y los espectrogramas de la componente vertical en cada una de las estaciones utilizadas para este estudio.

Tabla 7. Contenidos frecuenciales encontrados en el análisis espectral para el sismo del 27 de agosto del 2013.

Estaciones	Cont. Frecuencial (Hz)	$f_{\text{máx}}$ (Hz)	Amplitud	f-Significativas (Hz)	Distancia Hipocentral (km)
YOT	0-43	12,20	8,46E-03	0-32	52,3
POP2	0-35	1,85	3,51E-03	0-7,5	152,0
ORTC	0-21	0,72	2,10E-02	0-2,5	174,0
SOTA	0-19	1,25	5,89E-05	0-2,8;2,8-5,5	197,0
GUY2C	0-15	2,00	7,27E-03	0-2,8	217,0
FLO2	0-10	0,70	3,79E-03	0-2	287,0
HEL	0-16	1,63	1,63E-05	0-4,5	290,0
GCUF	0-15	0,31	2,86E-05	0-6	302,0
TUM	0-9	0,80	4,55E-02	0-2,2	314,0

Al analizar la distancia hipocentral con el intervalo de los contenidos frecuenciales se observa que las estaciones más cercanas al epicentro contienen intervalos más largos tanto de rango frecuencial como

de rango de frecuencias sobresalientes y las más alejadas contienen intervalos más cortos (Figura 5). Cabe destacar que la estación con mayor frecuencia máxima en su espectro es YOT con 12,20 Hz.

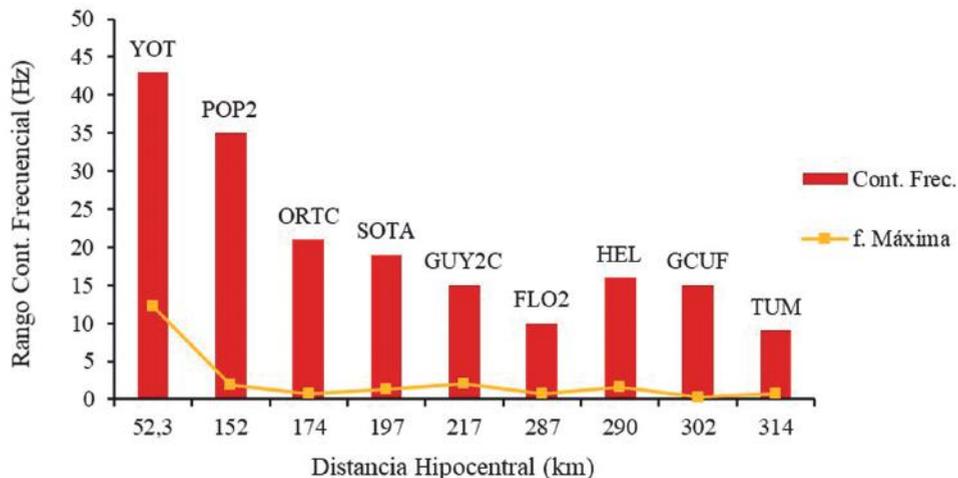


Figura 5. Relación entre el rango del contenido frecuencial y la distancia hipocentral para el sismo del 27 de agosto del 2013.

Comparando las transformadas de Fourier calculados con la distancia hipocentral (Anexo Figuras A-H) se observa que las estaciones más cercanas presentan rangos amplios de frecuencias sobresalientes con atenuaciones prolongadas y las más lejanas tienen rango corto con atenuaciones abruptas. Esto se debe a la atenuación de las ondas cuando éstas se propagan en el interior de la tierra.

Caracterización geológica de la zona según los contenidos frecuenciales

Cada una de las estaciones utilizadas en este estudio se encuentran ubicadas en zonas de diferentes

características (como el tipo de suelo, la fuente sísmogénica, entre otros), los contenidos frecuenciales se registran de manera diferente según aspectos geológicos y tectónicos de la zona epicentral, los parámetros del sismo, y la propagación de las mismas ondas en el interior de la tierra. Según el mapa geológico de Colombia (Nivia-Guevara, 2001), se puede determinar la unidad geológica donde se encuentra ubicada cada una de las estaciones. En la Tabla 8 se describen los rangos de frecuencias significativas y de los contenidos frecuenciales reportados en cada estación donde se registró el sismo del 27 de agosto del 2013 producido por la falla Río Bravo, también aparece la respectiva unidad geológica.

Tabla 8. Comparación entre la geología, los rangos de los contenidos frecuenciales y las frecuencias significativas para el sismo del 27 de agosto 2013.

Estaciones	Geología	Sismo 27/08/2013		
		Cont. Frecuencial	f-Significativas	Distancia Hipocentral (km)
YOT	Lava	0-43	0-32,0	52,3
POP2	Lava	0-35	0-7,5	152,0
ORTC	Areniscas	0-21	0-2,5	174,0
SOTA	Andesita	0-19	1-5,5	197,0
GUY2C (GUY)	Andesita	0-15	0-2,8	217,0
FLO2	Arcillolitas	0-10	0-2,0	287,0
HEL	Dunitas	0-16	0-4,5	290,0
GCUF	Tobas de ceniza	0-15	0-6,0	302,0
TUM	Gravas	0-9	0-2,2	314,0

Los rangos de frecuencias significativas son muy importantes, ya que se encuentran definidas como las frecuencias de mayor amplitud en los espectros de la Transformada de Fourier. Estas frecuencias definen que tipo de estructura presentaría el fenómeno de resonancia ante un evento sísmico según su contenido frecuencial. Así, las estructuras con frecuencias fundamentales dentro de este intervalo, mostrarán una amplificación en su aceleración o velocidad, generándose aquel fenómeno físico. Por ejemplo, los edificios y puentes son estructuras con frecuencias fundamentales bajas, mientras que las viviendas de dos pisos o menos tienen frecuencias altas, lo que indica que las estructuras como edificios son más propensas a presentar este fenómeno con eventos lejanos y las casas con eventos cercanos, generando diversos tipos de daños en la estructura. En la ciudad de Santiago de Cali se ha observado este fenómeno en varias estructuras debido a eventos sísmicos, por

ejemplo, el sismo ocurrido el 15 de noviembre del 2004 de 7,2 MI con epicentro en el municipio de Pizarro, departamento del Chocó. Este evento generó daños en varias estructuras ubicadas especialmente en la zona de la Avenida Roosevelt, núcleos hospitalarios y residencias mostraron la magnitud de repercusiones que puede generar un sismo, incrementando el miedo en la ciudadanía (Salcedo-Hurtado y Alvarado-Flórez, 2007).

Ahora bien, la geología también juega un papel esencial ya que en la propagación de las ondas sísmicas hay tres factores fundamentales que contribuyen al movimiento: la fuente, el medio por el cual se transmiten las ondas y el efecto local. Este último es de gran importancia en el diseño sísmico resistente. Se ha comprobado que existe una constante variación del movimiento sísmico registrado, que en algunos casos no se pueden explicar en función de la fuente o de la trayectoria intermedia

recorrida por las ondas (Álvarez-Rubio, 1999). Los efectos locales están causados por la interacción del campo de propagación de las ondas sísmicas con las irregularidades del terreno. Estas se pueden clasificar en superficiales y subsuperficiales. Las primeras son aquéllas relacionadas con la topografía del terreno e incluyen los efectos provocados por taludes, valles, montañas, etc. Las segundas están relacionadas con distintos tipos de discontinuidades en el terreno y que incluirían fallas, cuencas sedimentarias, etc. (Rodríguez, 2005; Bommer, 1994).

Es bien conocido que la amplitud, la composición espectral y la duración del movimiento ocasionado por un sismo registrado en un emplazamiento son funciones del mecanismo de la fuente sísmica, de la distancia al epicentro, de la geometría y de las propiedades físicas de las estructuras geológicas atravesadas por las ondas que se propagan por la superficie y el interior de un cuerpo desde la fuente al emplazamiento (Hays, 1989).

Al movimiento ondulatorio que llega a la base rocosa, contribuyen muchos aspectos del terreno como las propiedades geológicas, topografías superficiales y composición y dirección de la radiación incidente en la base rocosa. Es claro que en el análisis espectral de un registro sísmico es un problema complejo, en el cual intervienen diferentes factores como la distancia hipocentral, el mecanismo de la fuente, las características del receptor, la geología, los cuales pueden ser separados por diversos procedimientos matemáticos (Shearer *et al.*, 2006); pero debido a la alta complejidad, en muchas ocasiones los estudios se realizan considerando solamente algunos de estos o una combinación de ellos. El presente trabajo, sin pretender simplificar el problema, se concentra en el análisis considerando las condiciones geológicas de la corteza en la región que, como lo menciona (Álvarez-Rubio, 1999), pese a la complejidad señalada, el efecto local se puede abordar sólo desde el punto de vista de la geología. Las características geológicas de la corteza en la región influyen en la atenuación de las ondas sísmicas y su frecuencia; por ejemplo, en regiones de alta actividad, donde la corteza está fuertemente fracturada, la atenuación suele ser más alta que en regiones donde la corteza es más íntegra; considerándose, por tanto, que el parámetro fundamental del sitio es la geología superficial, porque puede modificar la amplitud y la frecuencia del movimiento (Bommer, 1994). Sir Williams Hamilton observó que las casas en el llano de aluvión sufren mayores daños que las casas construidas encima de roca (Ambraseys, 1977). Después del terremoto de

Michoacán del 19 de septiembre de 1985, se pudo notar que éste ocasionó graves daños en la ciudad de México D.F., situada a una distancia de 400 km de la fuente, debido al efecto de los depósitos blandos, sobre el movimiento del terreno (Anderson *et al.*, 1986). La topografía también puede modificar las vibraciones sísmicas, siendo otro parámetro del sitio que ha sido considerado en varios estudios de movimientos fuertes (Bommer, 1994).

Diferentes parámetros del movimiento fuerte son afectados por una capa de suelo en diferentes maneras, según las frecuencias con las que estén asociados (Rogers *et al.*, 1984). La diversidad de clasificaciones de condiciones geológicas en estudios de movimientos fuertes refleja la naturaleza complicada y poco comprendida de la relación entre el movimiento sísmico y los depósitos superficiales (Campbell, 1985). La clasificación normalmente se hace según el tipo de depósito (roca, aluvión), su profundidad y sus propiedades generales (blando, rígido), aunque en algunos casos se basa en propiedades medidas, como la velocidad de ondas de corte (Joyner y Fumal, 1984).

Aunque no hay una relación directa entre los contenidos frecuenciales y la geología, debido a los diferentes parámetros que los componen, se puede realizar un análisis considerando solamente la geología y observando los cambios en contenidos frecuenciales que esta puede producir, reconociendo la incidencia y la importancia de los demás factores, y dejando esta puerta abierta para futuras investigaciones.

De esta manera, en el presente trabajo se considera la geología para observar posibles cambios en los contenidos frecuenciales en las zonas donde se localizan las diversas estaciones que registraron el sismo del 27 de agosto del 2013. En la Tabla 8 se observa similitud en los contenidos frecuenciales entre las estaciones de Yotoco y Popayán, ambas ubicadas en suelos de material de lava. Además, variaciones en sus intervalos de frecuencias significativas para las estaciones que se encuentran ubicadas en arenas o areniscas, y contenidos frecuenciales menores para la estación de Tumaco ubicada en gravas.

En la Tabla 8 sobresalen estaciones como YOT y POP2 con frecuencias significativas altas y contenidos frecuenciales altos, siendo YOT la estación que presentó el mayor rango de frecuencias significativas. Estas se localizan en lava, con un tipo de roca K2-Vm7 que describen basaltos toleíticos y doleritas, y brechas volcánicas (Gómez *et al.*, 2015). Con la estación YOT,

ubicada en cercanía a rocas de gabros que varían de olivínicos a cuarzogabros, a través de noritas, y con POP2 cercanos a rocas de flujos volcanoclásticos constituidos por piroclasto y apiclastos de composición andesítica y dacítica (Figuras 6A y 6B). Estas dos estaciones mostraron amplificación en sus frecuencias probablemente debido a que se encuentran ubicadas en

una zona de composición de rocas volcánicas y lavas producidas por erupciones de volcanes cercanos y por meteorización de roca, ya sea física o química, por transporte de sedimentos mediante vientos, reacciones químicas de los componentes de la roca con el agua, entre otras.

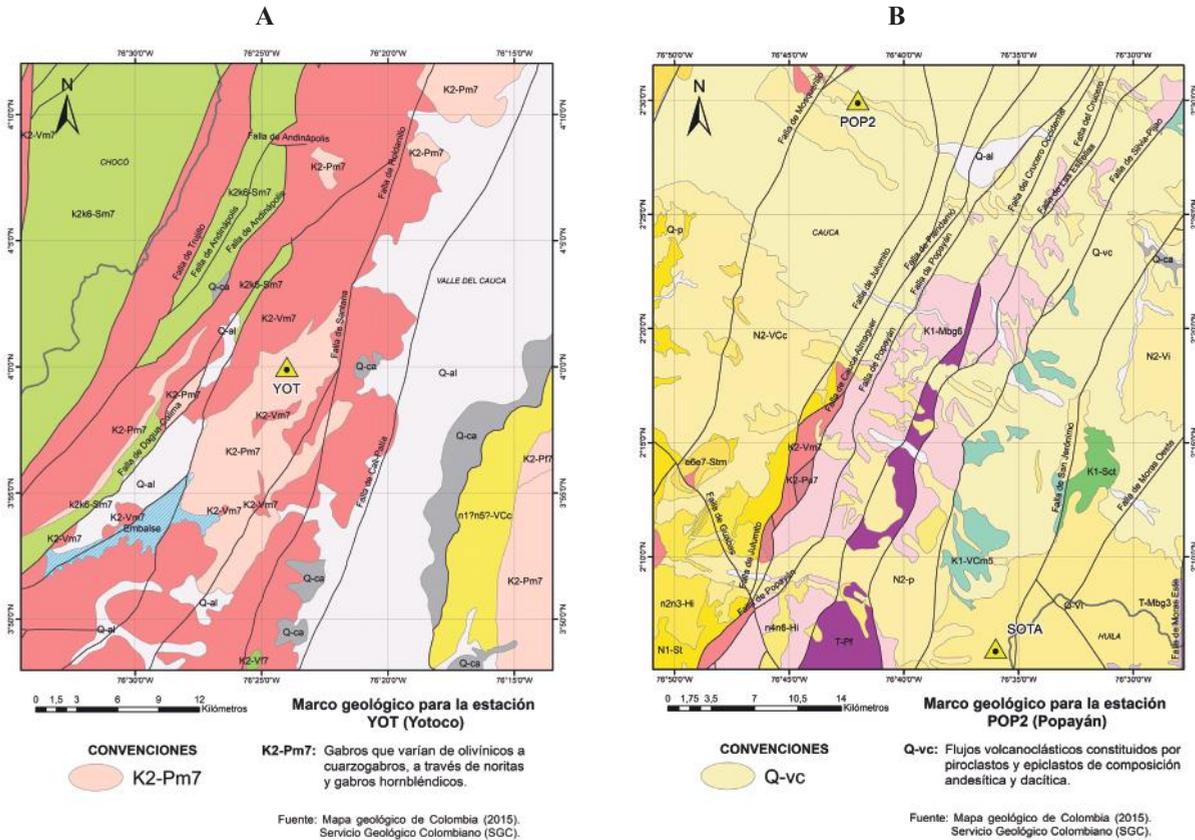


Figura 6. Geología de la zona donde se ubica las estaciones: A. YOT y B. POP2 (Gómez et al., 2015).

A pesar de la cercanía de la estación de SOTA con la de POP2, el comportamiento en el espectro de Fourier se observa diferente (Anexo Figuras B y D), ya que en la estación de SOTA las frecuencias no muestran tantas variaciones en la amplitud, en comparación con POP2. Estas dos estaciones se encuentran en lugares con geología diferentes. La estación de SOTA está ubicada en medio de areniscas y basaltos de composición básica a diferencia de POP2.

Para la estación de TUM se observa que los intervalos de contenidos frecuenciales son bajos para el sismo del 27 de agosto de 2013. Se localiza sobre depósitos de gravas y arenas acumulados en playas -Q2-m- (Figura 7).

Se puede observar que la estación de YOT registra una frecuencia máxima más alta que las demás estaciones, mientras que la estación TUM muestra la segunda frecuencia máxima más baja, indicando que posiblemente para la roca compuesta por depósitos de grava hallada en el municipio de Tumaco y en sus zonas aledañas se presenta atenuación en el contenido frecuencial y frecuencias significativas muy bajas en comparación con las demás estaciones, aunque su amplitud fue la más sobresaliente, teniendo frecuencias bajas pero con las amplitudes más altas reportadas en el estudio.

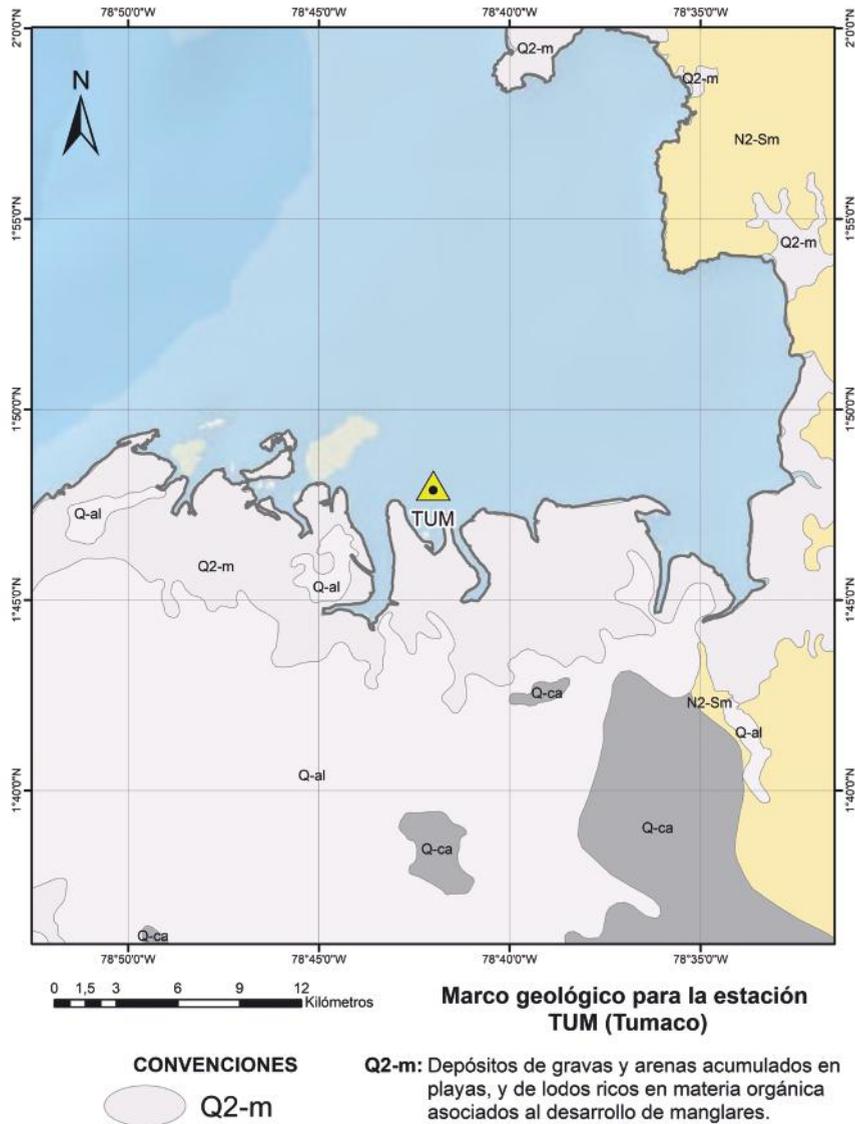


Figura 7. Geología de la zona donde se ubica la estación de TUM (Gómez *et al.*, 2015).

Para las estaciones de SOTA y GUY2C, que también se encuentran en los mismos tipos de roca como areniscas, se observan que al aumentar la distancia hipocentral, así sea en pocos kilómetros, disminuye el rango de los contenidos frecuenciales. Las dos estaciones presentan frecuencias significativas altas desde un rango de 0 a 5 Hz aproximadamente, sin embargo, para la estación de GUY2C se observó un rango menor de estas y con amplitudes mucho mayores.

Finalmente, las demás estaciones registraron un comportamiento similar entre ellas, sobresaliendo algunas con intervalos de frecuencias significativas

en donde su amplitud varía, observando rangos oscilatorios con amplitudes no tan altas y otras muy altas, indicando perturbación en las ondas sísmicas que se propagan en la zona y múltiples composiciones de rocas generadas con el paso de los años.

Estas estaciones tienen similitudes en su geología, ya que se encuentran localizadas en zonas compuestas por múltiples sedimentos acumulados al paso de los años, con mayor cantidad de arenas, generando variabilidad en las amplitudes de las frecuencias calculadas por la transformada de Fourier, siendo sus amplitudes muy bajas con respecto a las demás

estaciones que registraron el evento del 27 de agosto de 2013, observando reducción en las amplitudes de las frecuencias. Además, estas observaciones también se han reportado en varios estudios en donde se ha registrado disminución en el factor de amplificación para lugares arenosos (Caillot y Bard, 1990; Chang *et al.*, 1991; Beresnev *et al.*, 1995).

Conclusiones

Aunque la geología y los contenidos frecuenciales no se encuentran directamente relacionados debido a los diferentes factores que producen los múltiples cambios de los contenidos frecuenciales, se puede considerar un factor, ya que considerarlos todos sería un trabajo de mayor rigor, mucho más extenso y de mayor evolución científica, debido a la gran dificultad y escasa información que hay en esta área. Sin embargo, en este trabajo se consideró el factor de la geología y se observaron cambios importantes en los contenidos frecuenciales.

Los contenidos frecuenciales encontrados en las estaciones fueron variando probablemente por la geología del lugar. Se observa que posiblemente para las estaciones localizadas en sedimentos producto de actividades volcánicas los rangos frecuenciales aumentan notablemente.

Las estaciones que se encontraban más alejadas del epicentro mostraron registros con pequeños rangos de contenidos frecuenciales y frecuencias significativas muy bajas, mientras que los registros de las estaciones que se encuentran más cercanas al epicentro tienen rangos altos tanto de contenido frecuenciales como de frecuencias significativas, indicando que estos disminuyen cuando su distancia hipocentral o epicentral aumenta. Esto ocurre debido a que los depósitos de suelo se comportan como filtros para la energía de alta frecuencia.

A pesar de la complejidad que representa el problema del análisis espectral de un terremoto, donde intervienen diversas variables que afectan la propagación de las ondas sísmicas, en este trabajo se ha tenido en cuenta el factor de la geología superficial, con la certeza que en futuros trabajos se pueden tomar otras variables para estudiar este fenómeno.

Las estaciones describen periodos altos en la señal que muestra la evolución temporal de las ondas, las frecuencias halladas en los espectros de Fourier son

variables y se relacionan, aunque no directamente, con las condiciones geológicas. Esto deja como invitación para futuras investigaciones, analizar los contenidos frecuenciales usando no solo la geología como un factor importante sino también tener en cuenta factores como la topología del terreno, la topografía de la superficie, la composición y dirección de la radiación incidente en la base rocosa, entre otras.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Observatorio Sismológico del Suroccidente Colombiano y al Servicio Geológico Colombiano por la información aportada para la realización de este trabajo. Así mismo al Centro de Sismología y Vulcanología de Occidente (SISVOC) en Puerto Vallarta, México, por los aportes esenciales en la ejecución del mismo. De igual manera, damos nuestro reconocimiento a los evaluadores que con sus cometarios y correcciones han contribuido significativamente a mejorar la calidad y presentación del trabajo.

Referencias

- Ambraseys, N.N. (1977). Earthquakes and drifting continents. In: V. Fuchs (ed.). *Forces of Nature* (pp. 235-264). London: Thames and Hudson.
- Anderson, J.G.; Bodin, P.; Brune, J.N.; Prince, J.; Singh, S.K.; Quass, R.; Onate, M. (1986). Strong ground motion from the Michoacan, Mexico Earthquake. *Science*, 233(4768), 1043-1049. doi: 10.1126/science.233.4768.1043
- Álvarez-Rubio, S. (1999). El efecto local sobre el movimiento sísmico del suelo: Fenomenología y resultados recientes. *Física de la Tierra*, 11, 141-173.
- Arévalo-Caro, M.N.; Alfaro-Castillo, A.J. (2002). Contenidos frecuenciales de sismos Colombianos registrados en BOCO y en SDV (1994-1996). *I Congreso Colombiano de Sismología*, Bogotá, Colombia.
- Benito, B.; Cabañas, L. (1999). Caracterización del movimiento del suelo en ingeniería sísmica. *Física de la Tierra*, 11, 49-79.

- Beresnev, I.; Wen, K.L.; Yeh, Y.T. (1995). Seismological evidence for nonlinear elastic ground behavior during large earthquakes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 14(2), 103-114. doi: 10.1016/0267-7261(94)00036-G
- Bolzan, M.J. (2004). Análise da transformada em ondas aplicadas em sinal geofísico. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 26(1), 37-41.
- Bommer, J. (1994). Sismología para ingenieros. Papeles Técnicos UCA, Serie: Fundamentos. F93001. Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas".
- Cahuari, A.; Tavera, H. (2007). Cálculo de la Magnitud Local (ML) a partir de registros de aceleración: Aplicación a sismos ocurridos en Perú. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 102, 117-126.
- Caillet, V.; Bard, P.Y. (1990). Characterizing site effects for earthquake regulations in the French seismicity context: a statistical analysis. *9th European Conference on Earthquake Engineering*, Moscow, Russia.
- Campbell, K.W. (1985). Strong motion attenuation relations: a ten-year perspective. *Earthquake Spectra*, 1(4), 759-804. doi: 10.1193/1.1585292
- Chang, C.; Tang, Y.; Mok, C.; Tang, H.; Power, M.; Stepp, J. (1991). Development of shear modulus curves based on Lotung downhole ground motion data. *2nd International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*. Saint Louis, USA.
- Dimaté, C.; Romero, J.; Ojeda, A.; Arcila, M.; Alvarado, C. (2005). Caracterización de Fuentes Sísmicas. Informe No.1-8. Estudio de Microzonificación Sísmica de Santiago de Cali. Subproyecto de Sismotectónica. Bogotá.
- Figuroa-Soto, A.; Clemente-Chávez, A.; Zúñiga-Dávila, F.R. (2010). Deconvolución de sismogramas digitales y determinación del ruido sísmico para el sismógrafo Trillium 120 instalado en el campus Juriquilla de la UNAM. *Bol-e Órgano de comunicación electrónica del Centro de Geociencias de la UNAM*, 6(1).
- Gómez, J.; Montes, N.E.; Nivia, Á.; Diederix, H. (2015). Mapa Geológico de Colombia 2015. Escala 1:1 000 000. Servicio Geológico Colombiano, 2 hojas. Bogotá.
- Güralp Systems. (2009a). Sheet for PASSCAL sensor - Güralp CMG-3 ESP. Page B.6. Güralp.
- Güralp Systems. (2009b). CMG-5T Triaxial Accelerometer Operator's guide Part No. MAN-050-0001. Issue E. Güralp. <https://www.guralp.com/documents/html/MAN-050-0001/>
- Güralp Systems. (2009c). MAN-030-0001 - Güralp 3T Operator's guide. Güralp. <http://www.guralp.com/documents/html/MAN-030-0001/>
- Güralp Systems. (2009d). CMG-DM24 Mk3 Digitalizer. Operator's guide Part No. MAN-D24-0004. Güralp. <https://www.guralp.com/documents/html/MAN-D24-0004/>
- Havskov, J.; Alguacil, G. (2004). *Instrumentation in Earthquake Seismology*. Vol. 358. Dordrecht: Springer.
- Havskov, J.; Ottemöller, L. (2005). *SEISAN Version 8.1 - introductory training course*. Norway: Bergen University.
- Hays, W. (1989). Aspectos fundamentales de la geología y la sismología para la microzonación sísmica. *Física de la Tierra*, 1, 217-250.
- ISC. (2013). International Seismological Center. <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/fmechanisms/>
- Joyner, W.B.; Fumal, T.E. (1984). Use of measured shear-wave velocity for predicting geologic site effects on strong ground motion. *8th World Conference on Earthquake Engineering*. San Francisco, USA.
- Kromer, R.P. (2006). Evaluation of the Kinematics/Quanterra Q330HR Remote Seismic System for IRIS/GSN. Sandia National Laboratories.
- López-Cardona, M.C. (2006). Análisis de deformación tectónica en los piedemontes de las Cordilleras Central y Occidental del Valle del Cauca, Colombia - Contribuciones Paleosísmicas. Tesis de Maestría, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia.

- Mora, D. (2014). Análisis espectral de datos sísmicos PP y PS para caracterizar un yacimiento, Campo Blackfoot, Canadá. Tesis, Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Venezuela.
- Moya, B. (2009). Análisis tiempo-frecuencia de la señal de vibración de un cambiador de tomas de carga. Tesis, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, España.
- Nivia-Guevara, A. (2001). Mapa geológico del departamento del Valle del Cauca. Escala 1: 250.000. Memoria explicativa. INGEOMINAS.
- Ordóñez-Piscocoya, J.A. (2005). Cálculo de la energía liberada por sismos a distancias teleísmicas mediante el método de la integral del espectro de potencia de las ondas de volumen. Tesis, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque, Perú.
- OSSO. (2013). Evento sísmico del 27 de agosto de 2013 "Restrepo, Valle del Cauca". Osso Informa, Informe No.6. Universidad del Valle.
- Paris, G.; Manchatte, M.N., Dart, R.L.; Haller, K.M. (2000). Map and database of Quaternary faults and folds of Colombia and its offshore regions. U.S. Geological Survey. Open-File Report 00-0284.
- Rodríguez, M. (2005). Caracterización de la respuesta sísmica de los suelos. Aplicación a la ciudad de Barcelona. PhD Tesis, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- Rochal, E. (2011). Conformación de la base de datos sísmicos para los registros de la Estación JUR1. Tesis, Universidad Autónoma de Querétaro, Juriquilla, México.
- Rogers, A.M.; Tinsley, J.C.; Borchardt, R.D. (1984). Geographic variation in ground shaking as a function of changes in near-surface properties and geological structure near Los Angeles, California. *8th World Conference on Earthquake Engineering*. San Francisco, USA.
- SAC. (2011). SAC User's Guide. <http://www.iris.edu/software/sac/manual/intro.html>
- Salcedo-Hurtado, E.J.; Alvarado-Flórez, C.E. (2007). Intensidades del sismo de Pizarro - Chocó del 15 de noviembre de 2004 en Cali - Colombia. *Revista Épsilon*, 9, 57-72.
- Salgado, M.A.; Bernal, G.A.; Yamín, L.E.; Cardona, O.D. (2010). Evaluación de la amenaza sísmica de Colombia. Actualización y uso en las nuevas normas colombianas de diseño sísmo resistente NSR-10. *Revista de Ingeniería*, 32, 28-37.
- Shearer, P.M.; Prieto, G.A.; Hauksson, E. (2006). Comprehensive analysis of earthquake source spectra in southern California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B6). doi: 10.1029/2005JB003979
- Sierra, J.; Marín, W.; Bonilla, M.; Campos, H. (2008). Descomposición espectral: nueva tecnología de frontera para la caracterización sísmica de yacimientos. *XIV Congreso Venezolano de Geofísica*. Caracas, Venezuela.
- Smith, J.O. (2007). *Mathematics of the Discrete Fourier Transform (DFT) with audio applications*. 2nd ed. Editorial Booksurge Publishing.
- Toshniwal (2014). Toshniwal Technologies PVT. Limited. Reftek Trimble.
- Woodward - Clyde Consultants. (1983). Seismic hazard evaluation Calima III Project. Consorcio Integral - Planes Ltda. Ingenieros Consultores Ira. parte. Corporación Autónoma Regional del Cauca (CVC), Colombia, 116p.
- Yuan, X.; Cai, L. (2003). Gearbox diagnosis using a modified Fourier series. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2003)*. Kobe, Japan.

Lina Vanessa Girón-Lozano
ORCID: 0000-0001-6976-8606

Elkin de Jesús Salcedo-Hurtado
ORCID: 0000-0002-6753-7094

Germán Pérez-Alcázar
ORCID: 0000-0002-5335-6903

Trabajo recibido: junio 08 de 2017
Trabajo aceptado: abril 30 de 2020

Anexo

Espectrograma y transformada de Fourier para las señales obtenidas en las estaciones que registraron el sismo ocurrido el 27 de agosto del 2013.

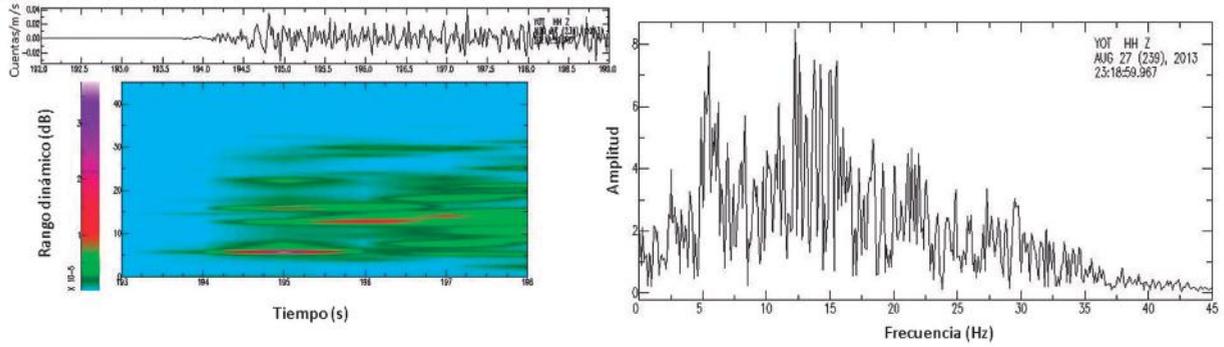


Figura A. Espectrograma y espectro de Fourier para el sismo registrado en la estación de YOT.

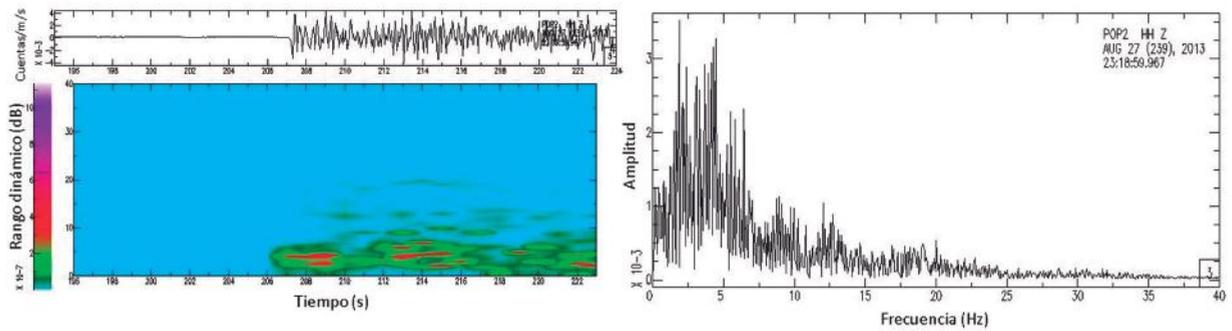


Figura B. Espectrograma y espectro de Fourier para el sismo registrado en la estación de POP2.

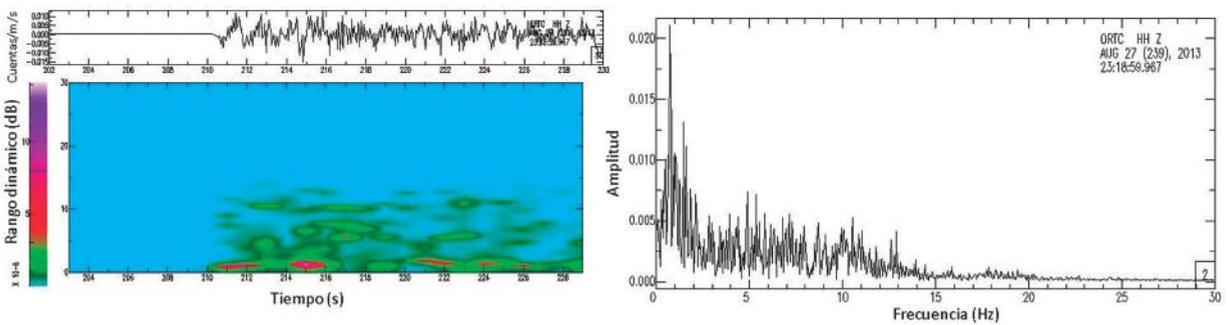


Figura C. Espectrograma y espectro de Fourier para el sismo registrado en la estación de ORTC.

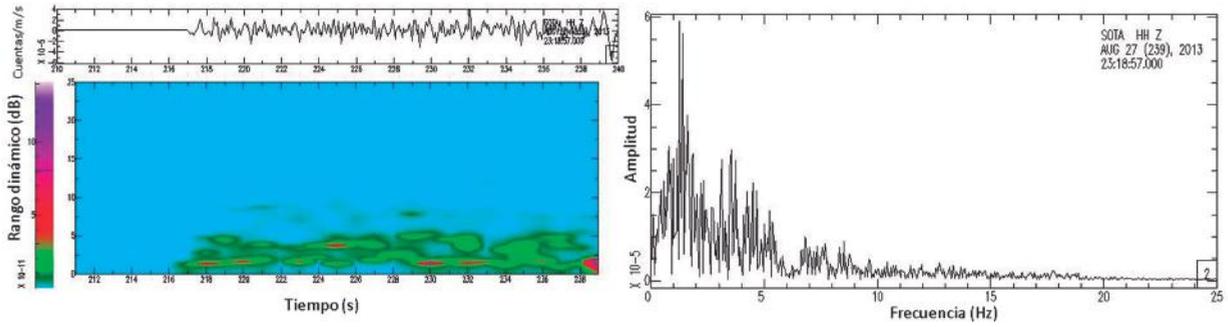


Figura D. Espectrograma y espectro de Fourier para el sismo registrado en la estación de SOTA.

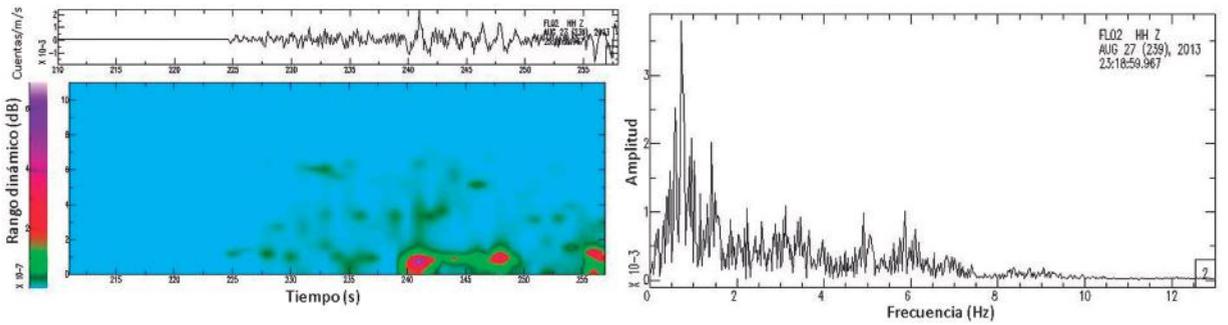


Figura E. Espectrograma y espectro de Fourier para el sismo registrado en la estación de FLO2.

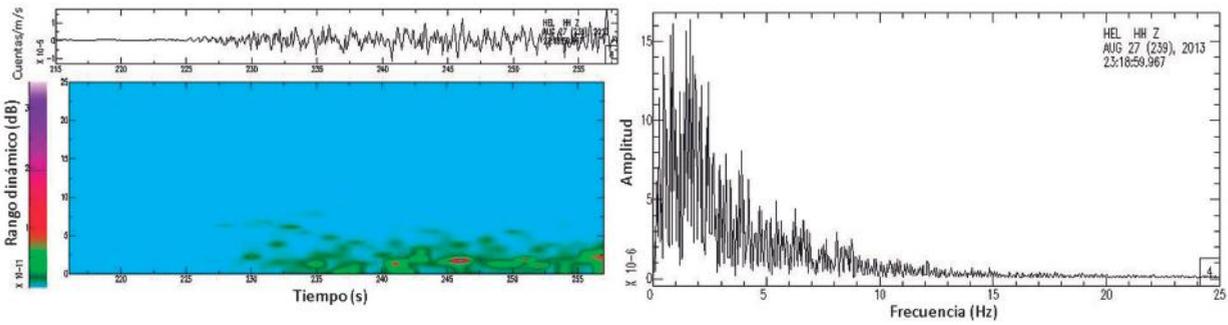


Figura F. Espectrograma y espectro de Fourier para el sismo registrado en la estación de HEL.

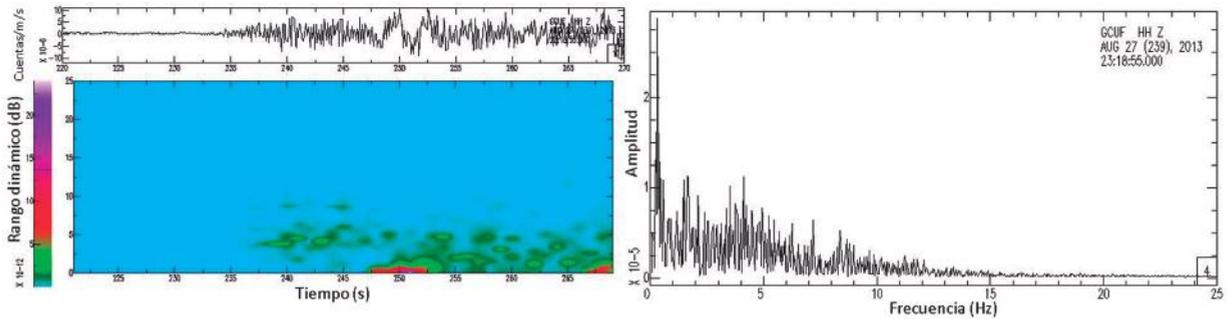


Figura G. Espectrograma y espectro de Fourier para el sismo registrado en la estación de GCUF.

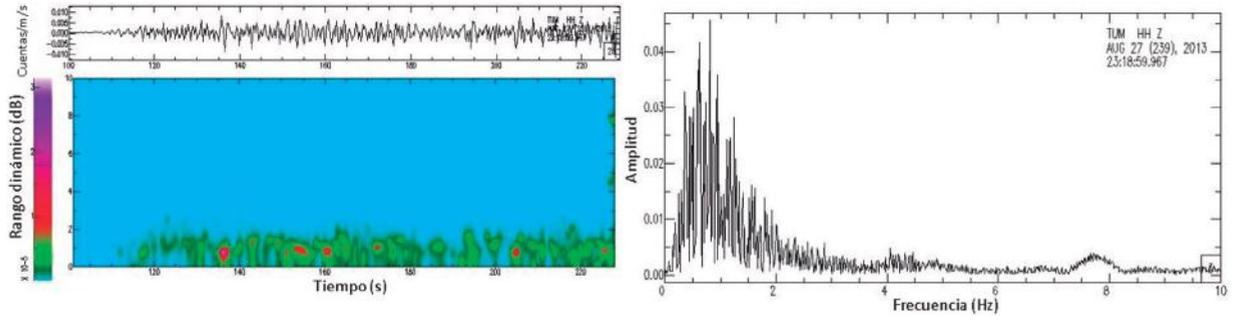


Figura H. Espectrograma y espectro de Fourier para el sismo registrado en la estación de TUM.