

POSIBLE RELACIÓN ENTRE SEÑALES ELECTROMAGNÉTICAS DE ORIGEN NO ANTRÓPICO Y EVENTOS SÍSMICOS, EN LA SABANA DE BOGOTÁ Y ALREDEDORES

POSSIBLE RELATIONSHIP BETWEEN ELECTROMAGNETIC SIGNALS OF NON-ANTROPIC ORIGIN AND SEISMIC EVENTS, IN THE SABANA DE BOGOTÁ AND SURROUNDINGS

Solano-Fino J.M.¹, Vargas C.A.¹, Caneva A.^{1,2}, Ochoa L.H.¹

jmsolanof@unal.edu.co, cavargasj@unal.edu.co, acanevar@unal.edu.co, lhochoag@unal.edu.co

*¹Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias, Edificio Manuel Ancizar,
Bogotá D.C., Colombia*

²Universidad Antonio Nariño, Centro de Investigaciones, Bogotá D.C., Colombia

Solano-Fino J.M., Vargas C.A., Caneva A., Ochoa L.H., (2018): *Posible relación entre señales electromagnéticas de origen no antrópico y eventos sísmicos, en la Sabana de Bogotá y alrededores*, Vol. 41. Bogotá, Colombia. pp. 61-75

Manuscrito recibido: 10 de diciembre 2018; aceptado: 7 de febrero de 2019

Resumen

El presente trabajo busca establecer una posible relación entre señales electromagnéticas (EM) y eventos sísmicos que ocurren en el sistema litosférico en la región central de Colombia. La relación de eventos se realizó con datos provenientes de la Red Sismológica de la Universidad Nacional de Colombia (RSUNAL), de una red sismológica temporal desplegada en Chichimene (Acacías, Meta) y de la Red Sismológica Nacional de Colombia. El proyecto contempló las fases de diseño y pruebas de desempeño de instrumentos de registro de señales sísmicas, variaciones de potencial eléctrico y variaciones del campo magnético, para, luego, intentar identificar relaciones entre dichas señales. Dentro de los principales hallazgos se encontró una ausencia casi completa de perturbaciones eléctricas visibles, conocidas como Señales Eléctricas Sísmicas (SES) y muy pocas de tipo magnético. Sin embargo, otro tipo de perturbaciones magnéticas identificadas, son prometedoras para análisis a largo plazo.

Palabras claves: Sismo, Pronóstico, Precursor, Señal electromagnética.

Abstract

The present work seeks to establish a possible relationship between electromagnetic signals (EM) and seismic events that occur in the lithospheric system in the central region of Colombia. The relationship of events was made with data from the Sabana de Bogotá Seismological Network (RSSB), a temporary seismological network deployed in Chichimene (Acacías, Meta) and the National Seismological Network of Colombia. The project considered the phases of design and performance tests of seismic signal recording instruments, variations of electric potential and variations of the magnetic field, to then try to identify relationships between these signals. Among the main findings was an almost complete absence of visible electrical disturbances, known as Seismic Electrical Signals (SES) and very few magnetic ones. However, another type of magnetic perturbations were identified, which are promising for long-term analysis.

Keywords: Earthquake, Forecast, Precursor, Electromagnetic Signal.

INTRODUCCIÓN

El pronóstico de eventos sísmicos implica la estimación de posibles parámetros hipocentrales, tiempo y magnitud del evento pronosticado. Llevar a cabo este tipo de pronóstico es una tarea compleja que plantea importantes retos relacionados con la comprensión de la mecánica de los terremotos, las variaciones permanentes del campo de esfuerzos y la estrategia tecnológica a utilizar. Hasta la fecha, este tipo de pronóstico se ha llevado a cabo considerando eventos de gran cantidad de energía liberada ($M > 5-6$). Así pues, la capacidad general para pronosticar terremotos, ya sea en forma individual o en una base estadística, sigue siendo remota (Tiampo & Shcherbakov, 2012).

Sin embargo, grupos de investigación de varios lugares del planeta han arrojado algunas luces sobre ciertos fenómenos precursores que tienen lugar previo a la ocurrencia de un sismo. En los últimos diez años ha habido progresos notables en las técnicas y métodos usados para el pronóstico de terremotos a nivel global. Modelos de procesos físicos tales como el *Accelerating Moment Release* (AMR), las variaciones del valor del parámetro b y la familia de algoritmos M8, entre otros; así como los modelos de sismicidad suavizados, cuyas técnicas más relevantes son 1) la sismicidad suavizada independiente del tiempo, 2) el modelo de Intensidad Relativa (RI) o 3) el Modelo Proporcional de Riesgo (PHM), dan cuenta de la variedad de opciones disponibles, cuyo estudio y modelamiento estadístico generan resultados esperanzadores en la materia (Tiampo & Shcherbakov, 2012). Otro de los métodos usados desde hace algo más de 20 años son las Señales Eléctricas Sísmicas (SES), y más recientemente el análisis de *tiempo natural*, basado en la correlación entre la ocurrencia de eventos sísmicos y las SES (Cicerone, Ebel, & Briton, 2009) (Dologlou, 2008) (Uyeda, Al-Damegh, Dologlou, & Nagao, 1999) (Varotsos, Alexopoulos, & Lazaridou, 1993). También hay registro del uso de las variaciones de baja frecuencia del campo magnético antes, durante y después de un terremoto con resultados positivos (Park, 1996) (Johnston, 1997).

En este trabajo se pretende identificar una posible relación entre señales EM registradas en la superficie terrestre y eventos sísmicos de mediana y gran escala, bajo la hipótesis de la existencia de precursores EM asociados a las fuentes sísmicas, que surgen previamente a eventos sísmicos energéticos, provocados aquéllos por mecanismos físicos establecidos (Clavijo Ramírez & Sánchez, J. J., 2016).

La región donde se realizó el despliegue instrumental corresponde a la Sabana de Bogotá (Colombia) y sus alrededores, con el apoyo de la Red Sismológica de

la Sabana de Bogotá (RSSB) y una red sismológica temporal desplegada en Chichimene (Acacías, Meta). Mediante estas redes se pretende registrar eventos sísmicos y señales EM, posiblemente relacionados con estos eventos sísmicos, generados en la región central de Colombia.

En la Figura 1 se muestra la ubicación de tres (3) estaciones multiparamétricas (registro de señales sísmicas, eléctricas y magnéticas) permanentes y una temporal (CH06). Fueron analizados sismos con magnitud $M > (2.758 + 0.0024) \log_{10} \frac{M}{M_0}$. Las perturbaciones magnéticas, principalmente de largo periodo, han dado lugar a ciertas conjeturas relacionadas con posibles precursores sísmicos, aspectos que son presentados y discutidos en este trabajo.

METODOLOGÍA

Se realizó un despliegue instrumental de estaciones sismológicas, junto con sistemas de detección de señales eléctricas y magnéticas en superficie. Compiladas las señales continuas por un período de varios meses, se procedió a identificar posibles correspondencias entre eventos sísmicos y perturbaciones EM previas a dichos eventos, en ventanas de hasta 11 días (Varotsos, Alexopoulos, & Lazaridou, 1993). Fueron realizados dos experimentos: durante el experimento 1, próximo al Sistema de Fallas Frontal del Llano, cerca del campo petrolero Chichimene (Acacías, Meta), entre enero y abril de 2015, se tenía como objetivo evaluar los requerimientos instrumentales al monitorear únicamente señales sísmicas y eléctricas; durante el experimento 2, se llevó a cabo el registro continuo de señales sísmicas, eléctricas y magnéticas, en tres estaciones de la RSSB, desde abril hasta diciembre de 2016. Este segundo experimento se llevó a cabo mediante el uso de estaciones permanentes, multiparamétricas de la RSSB, proyecto cofinanciado por COLCIENCIAS, la Universidad Nacional de Colombia y la Universidad Antonio Nariño (Solano-Fino, 2017).

Experimento 1: campo Chichimene (Acacías, Meta)

Entre enero y abril de 2015, la Universidad Nacional de Colombia desplegó, de manera temporal, una red sismológica portátil, alrededor de un clúster de extracción de crudo, para establecer línea base de sismicidad en Chichimene, caserío del municipio de Acacías (Meta). Durante ese experimento se instalaron dos (2) pares de electrodos de polo a tierra (en configuración cuasi-ortogonal) de cobre, de 70 cm cada uno, con una separación entre los electrodos de aproximadamente 50 m y con orientaciones N-S y E-W. Dichos electrodos se conectaron mediante cable

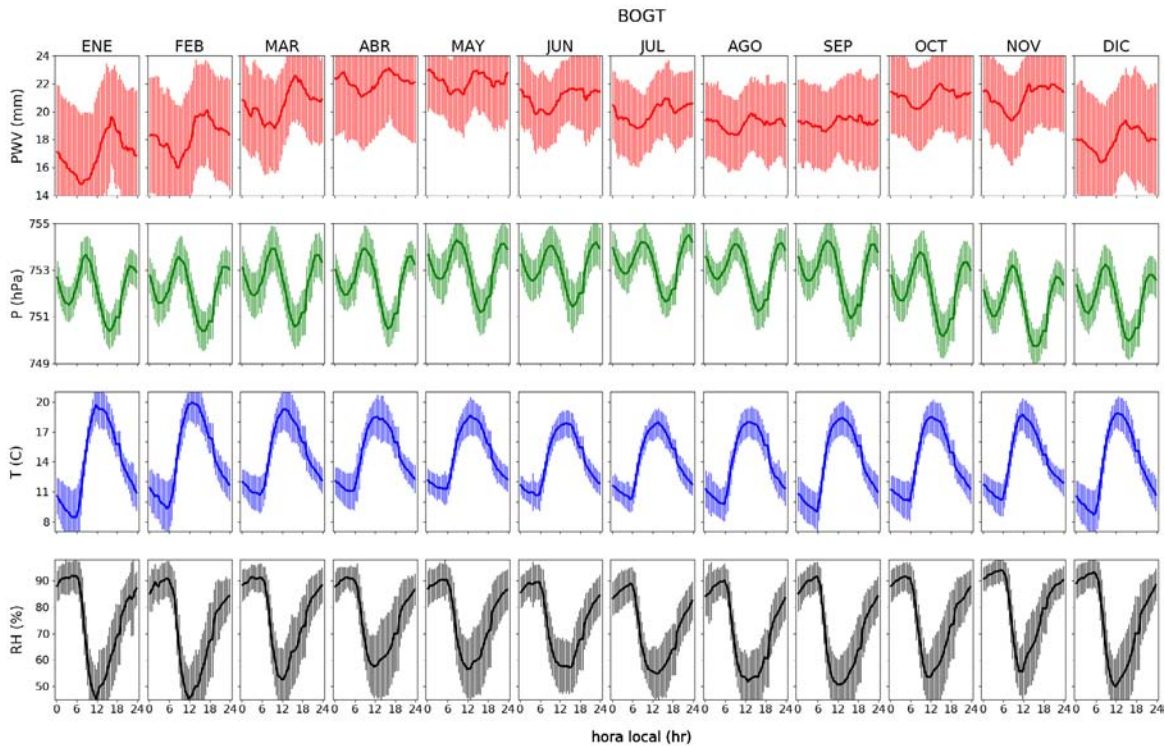


Figura 1. Mapa general de experimentación. Estaciones multiparamétricas permanentes (3) y temporal (1) y sísmos analizados para cada caso. Experiment general map. Permanent multiparametric stations (3) and temporal (1) analyzed seisms for each case.

calibre 14 a una tarjeta de adquisición de 16 bits, que a su vez fue conectada a un computador portátil, donde se almacenó la información registrada a 200 muestras por segundo. En la [Figura 2](#) se muestra una caseta típica para el sistema de adquisición de la red portátil (Solano-Fino, 2017).

En la estación CH-06 se almacenó la información de los electrodos desde el 07 de febrero hasta el 3 de abril. La [Figura 3](#) muestra una vista superior de la ubicación de los electrodos en el terreno, formado un sistema de dos (2) dipolos eléctricos perpendiculares.

Experimento 2: Estaciones multi-paramétricas de la Red Sismológica de la Sabana de Bogotá

El proyecto Red Sismológica de la Sabana de Bogotá (RSSB), es un proyecto, que incluye un despliegue instrumental cuya implementación ha sido cofinanciada por COLCIENCIAS, la Universidad Nacional de Colombia y la Universidad Antonio Nariño, y que ha funcionado desde 2008. Se trata de un arreglo híbrido de diez (10) estaciones sismológicas triaxiales, seis

(6) de banda ancha y cuatro (4) de período corto. Tres (3) de las seis (6) estaciones de banda ancha son multiparamétricas, dado que cuentan con cinco (5) canales adicionales, tres (3) magnéticos de componentes ortogonales, y dos (2) eléctricos ortogonales en superficie (Solano-Fino, 2017).

Para este trabajo se utilizaron los registros de las tres (3) estaciones multiparamétricas, las cuales se encuentran ubicadas en Usme (Bogotá), Tunja (Boyacá) y Villavicencio (Meta).

En la [figura 4](#) se muestra la ubicación de las estaciones de la RSSB. En color amarillo se muestran las estaciones sismológicas y en color rojo las estaciones multiparamétricas.

Los sensores usados en las estaciones multiparamétricas son:

- **Sismómetro Banda Ancha CME 4311:** Transductor electroquímico diseñado para instalación permanente o portable. Este es un instrumento robusto y fácil de instalar. Además, no requiere mantenimiento, bloqueo de masas



Figura 2. Caseta típica para el sistema de adquisición de la red portátil (estación sísmológica CH-06).

Typical portable acquisition network stand installation. (CH-06 seismological station)

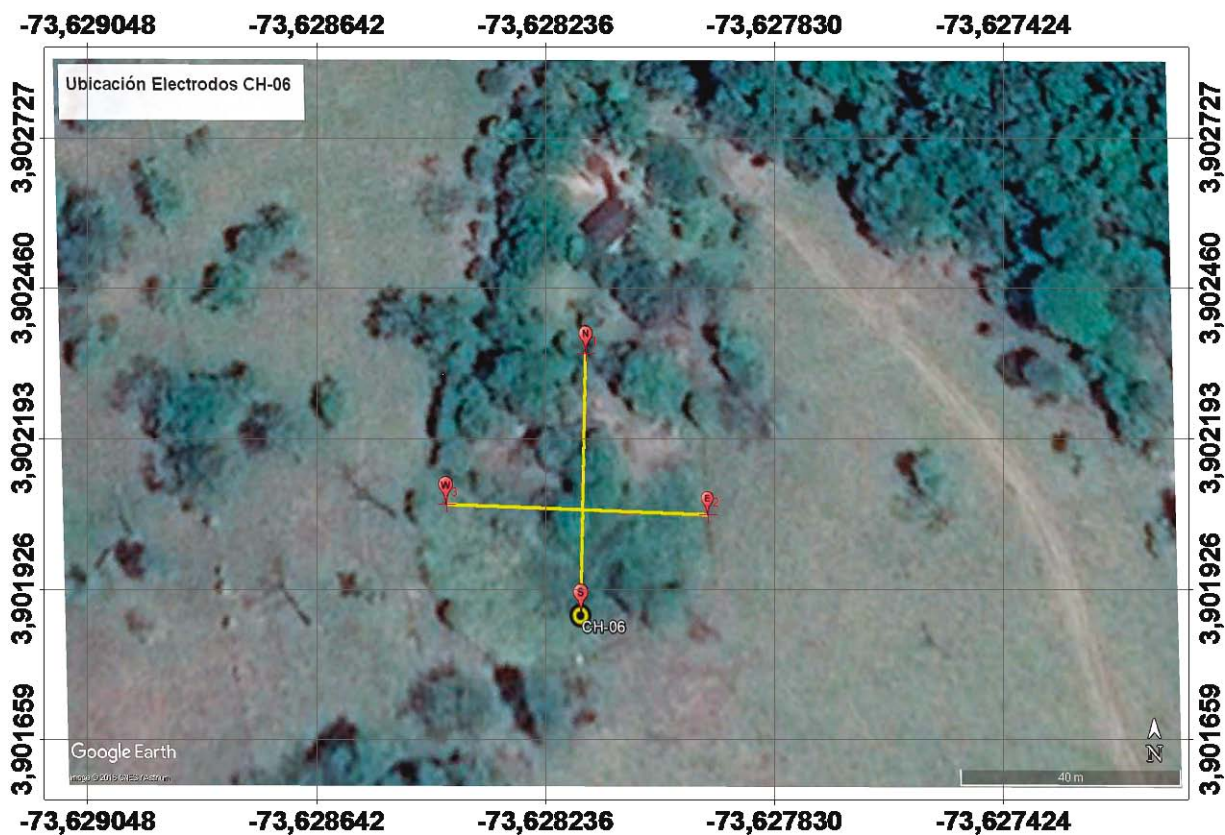


Figura 3. Ubicación de los electrodos (puntos rojos). Estación CH-06. Dipolo N-S = 50 m, dipolo E-W = 51 m.

Electrodes location (red dots). Station CH-06. N-S Dipole = 50m, E-W dipole = 51m.

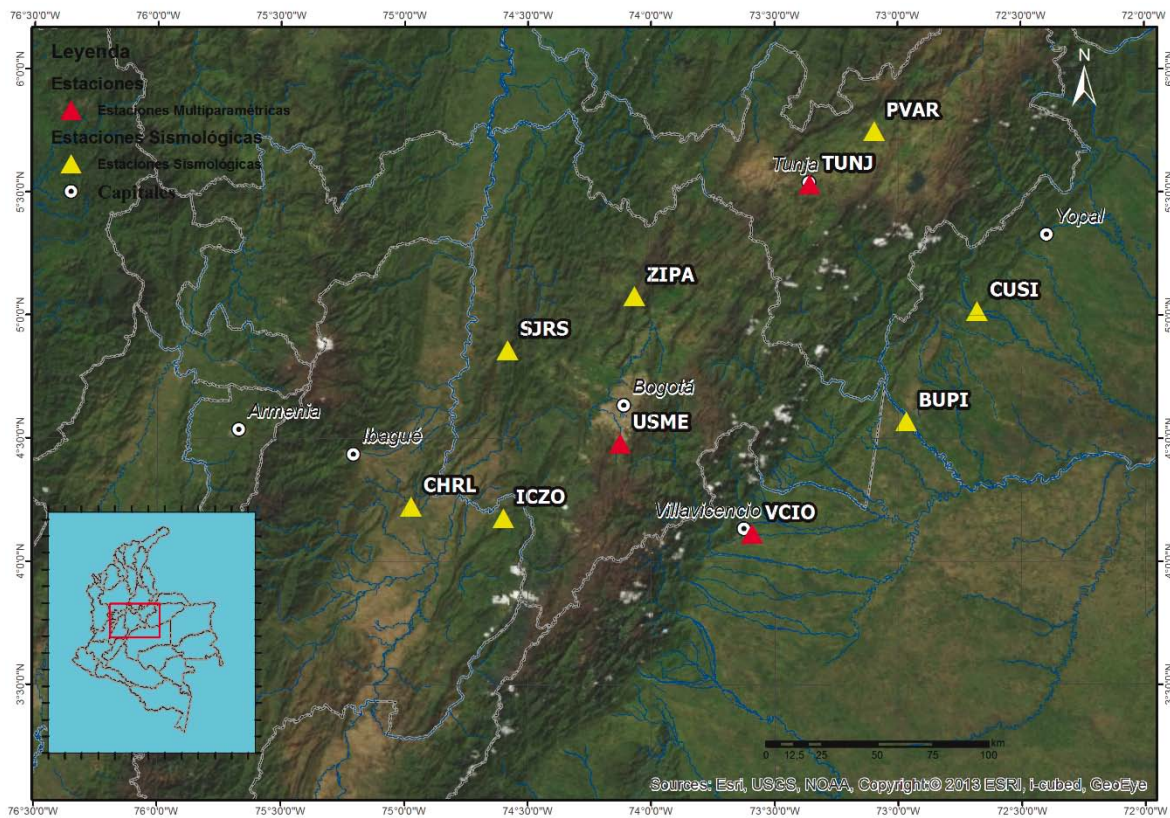


Figura 4. Ubicación de las estaciones de la Red Sismológica de la Sabana de Bogotá. En amarillo las estaciones sismológicas, en rojo las estaciones multiparamétricas.

“Sabana de Bogotá” Seismological Network stations location. In yellow seismological stations, in red multiparametric stations.

ni nivelado. El instrumento ofrece una solución efectiva para instalaciones con un nivel de ruido cercano al modelo de bajo ruido (CME, 2016).

- **Electrodo no polarizable para enterrar Tinker & Razor:** Es un electrodo de cobre y sulfato de cobre (Cu/CuSO₄), no polarizable, que permite exposición directa del sulfato de cobre en una gran área de contacto. Tiene una vida útil de hasta 10 años. Su estructura está hecha de PVC/ABS y tiene bajo punto de congelación y alto punto de evaporación lo que lo hace robusto para la mayoría de ambientes. Dimensiones 7 cm diámetro, 12,2 cm alto y un peso de 896 g.
- **Magnetómetro Bartington Mag648L:** Es un magnetómetro triaxial de bajo consumo, bajo ruido y variados rangos de medición. Tiene aplicaciones en vigilancia vehicular y de bahías, seguridad perimetral e integración en sistemas multisensor (multiparamétricos).

Las estaciones multiparamétricas fueron diseñadas y ensambladas en el Laboratorio de Instrumentación de Geofísica (LIG) del Departamento de Geociencias

de la Universidad Nacional de Colombia. Constan de un PC de 10 pulgadas y tres dispositivos de hardware comunicados a través de puertos USB: una tarjeta de adquisición (7 canales diferenciales a 16 bits y frecuencia de muestreo hasta 3 kHz), un GPS 18x LVC (Garmin International Inc., 2011) y un módem 3G para el envío de los datos a través de la red de telefonía celular.

Cada estación consta de los elementos anteriormente descritos, ubicados en un maletín resistente, con puertos de conexión externa para los sensores predeterminados (sismómetro banda ancha, electrodos y magnetómetro). Las conexiones externas son tres puertos para los sensores, un puerto USB para módem, un puerto USB para GPS y una conexión de dos hilos para la alimentación, con la cual se logran bajos niveles de ruido electromagnético.

Cada estación almacena y envía en tiempo cuasireal información de tres canales sísmicos, dos eléctricos y tres magnéticos. La nomenclatura de los canales, acorde a lo indicado en el Seed Reference Manual (Ahern, Casey, Barnes, Benson, & Knight, 2014), se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Nomenclatura de canales usada en las estaciones multiparamétricas.

Channels nomenclature used on multiparametric stations

Sensor	Canal	Nomenclatura
Sismómetro	Norte	BHN
	Este	BHE
	Vertical	BHZ
Dipolos	Norte	HQN
	Este	HQE
Magnetómetro	Norte	HFN
	Este	HFE
	Vertical	HFZ

Las estaciones multiparamétricas se encuentran instaladas en las sedes Usme (Bogotá), Villavicencio (Meta) y Tunja (Boyacá) de la Universidad Antonio Nariño (UAN), garantizando su seguridad física. Su

instalación se realizó siguiendo las recomendaciones general para instalación de estaciones de medición de SES (Varotsos, Sarlis, & Skordas, 2006). El digitalizador, el sismómetro y el magnetómetro fueron instalados dentro de una caseta de 1 m x 1 m x 1 m, con acceso a la red de energía eléctrica urbana. Los electrodos fueron instalados según las posibilidades de dimensiones del terreno y topográficas que ofrece cada una de las sedes de la UAN involucradas. Las ubicaciones de los electrodos, formando dipolos cuasiortogonales, se muestran en la Figura 5, la Figura 6 y la Figura 7.

La conexión entre los electrodos y el digitalizador se realizó mediante cable coaxial, para disminuir el ruido EM. La conexión del cable al electrodo se protegió con silicona para reducir la corrosión. Cada electrodo se encuentra enterrado a aproximadamente 50 cm de profundidad.

Procesamiento de la información

Adquirida la información, se procedió a seleccionar la ventana de tiempo a analizar. Teniendo en cuenta que las SES podrían aparecer desde minutos antes, hasta 11 días previos a un evento sísmico (Varotsos,



Figura 5. Ubicación electrodos estación Tunja (TUNJ). Dipolo N-S = 85 m; dipolo E-W = 67 m.

Tunja (TUNJ) station electrodes location. N-S dipole = 85m; E-W dipole = 67m



Figura 6. Ubicación electrodos estación Usme (USME). Dipolo N-S = 97 m; dipolo E-W = 98 m. Usme (USME) station electrodes location. N-S dipole = 97m; E-W dipole = 98m



Figura 7. Ubicación electrodos estación Villavicencio (VCIO). Dipolo N-S = 130 m; dipolo E-W = 70 m. Villavicencio (VCIO) station electrodes location. N-S dipole = 130m; E-W dipole = 70m

Alexopoulos, & Lazaridou, 1993), la ventana de tiempo a analizar empezó 11 días antes del evento seleccionado y terminó 24 horas después del evento, esto para verificar la posible presencia de perturbaciones postevento. Los eventos sísmicos tenidos en cuenta fueron aquéllos con magnitud mayor o igual a 4,2, con epicentro a una distancia no mayor a 150 km de cualquiera de las estaciones o hasta 300 km si la magnitud del sismo es $M_w > 5$. En la Tabla 2 y en la Tabla 3 se muestran los sismos considerados para el análisis.

RESULTADOS

A continuación se describen los hallazgos más relevantes realizados durante los experimentos 1 y 2.

Experimento 1

Luego de preprocesar la información proveniente de los dos pares de electrodos instalados en la estación CH-06 de la red sismológica portátil, desplegada en el campo Chichimene, se realizó el procesamiento en el dominio del tiempo incluyendo combinación de trazas, reparación de huecos y solapamientos, y filtrado (Solano-Fino, 2017).

El evento sísmico más importante en Colombia en el intervalo de tiempo del estudio fue un sismo con epicentro en la Mesa de los Santos, Santander, $H = 160$ km y $M_w 6.4$, ocurrido el 10 de marzo de 2015 (315 km de distancia del arreglo). Para este evento se consideró la ventana entre el 1 de marzo y el 11 de marzo de 2015. Los registros correspondientes se muestran en la Figura 8.

En términos generales, se observa una señal sísmica de regular calidad debido, principalmente, al ruido cultural y al ruido generado durante las visitas técnicas a la

estación, que implicaban inevitables pisadas realizadas por el personal y, por otro lado, la manipulación de los equipos durante los trabajos de mantenimiento, que se llevaban a cabo prácticamente a diario.

Por otro lado, el canal HQE (correspondiente al dipolo E-W) tiene evidentes cambios de nivel DC a lo largo de los dos meses de registro, sobre todo, a partir del 21 de febrero de 2015, fecha en la cual se cambió el rango de entrada de la tarjeta de adquisición para recibir variaciones de voltaje más pequeños.

Luego de observar y seleccionar manualmente los cambios de nivel DC más representativos de la ventana, es decir, las posibles SES, se procedió a relacionar estas posibles SES con el evento en cuestión. Sólo una perturbación significativa fue observada previa al sismo con duración de 19,5 horas a las 10:15 horas del 7 de marzo de 2015. Por tratarse de una perturbación en sólo uno de los canales eléctricos, es difícilmente caracterizable como una SES, pues no cumple con los criterios descritos por Varotsos et. al. (1993). Sin embargo, bajo el supuesto de ser una SES el intercepto propio de la estación es:

$$ZWD = ZTD - ZHD \quad (\text{Varotsos P. , 1984}).$$

Se observa entonces que, al ser tratadas como SES las perturbaciones del campo eléctrico, éstas podrían ser consideradas precursores sísmicos, sin embargo, la longitud temporal de la muestra es muy corta para asegurarlo (Varotsos, Sarlis, & Skordas, 2011). Además, se debe tener en cuenta que no fueron cumplidos todos los criterios para establecer como verdaderas las SES identificadas, no sólo porque aparecieron sólo en el canal HQE y no en el HQN, sino porque su comportamiento no es el ideal: en ocasiones la variación es suave, pero

Tabla 2. Eventos sísmicos considerados para el análisis de precursores para en el experimento 1.

Seismic events considered for the experiment 1 precursors analysis

#	Fecha	Hora	Lat	Long	Prof	Mag	Departamento	Municipio
		UTC	[°]	[°]	[km]	[Mw]		
1	13/02/2015	04:45:27	6,821	-73,175	152,0	4,7	Santander	Zapatoca
2	21/02/2015	22:26:45	4,674	-76,186	95,5	5,0	Valle del cauca	Argelia
3	22/02/2015	12:56:24	2,785	-76,529	138,7	4,6	Cauca	Caldono
4	24/02/2015	04:29:58	6,841	-73,116	152,6	4,5	Santander	Los Santos
5	10/03/2015	20:55:44	6,825	-73,134	157,7	6,4	Santander	Los Santos
6	22/03/2015	22:27:37	6,804	-73,147	154,6	5,0	Santander	Los Santos
7	24/03/2015	20:52:27	6,801	-73,154	153,8	4,5	Santander	Los Santos

en otras es casi instantánea, así como su nivel de ruido de frecuencia alta ($f > 1$ Hz) aparecía y desaparecía sin una razón clara.

Experimento 2

Registros obtenidos

Para la información proveniente de las estaciones USME, TUNJ y VCIO de la Red Sismológica de la Sabana de Bogotá (RSSB) se realizó un procedimiento similar al anterior. Incluyó escalado de la información a las unidades correspondientes de campo eléctrico [V] y campo magnético [nT] de ventanas de 11 días previos a cada evento o conjunto de eventos. La Tabla 3 relaciona los eventos analizados, clasificados en cinco (5) grupos, por agrupación temporal.

Luego del procesamiento y análisis de las gráficas obtenidas, se presentan únicamente los resultados de las 3 estaciones para los eventos del grupo C respectivamente, por ser aquéllos para los cuales los registros fueron de mejor calidad y con anomalías más visibles.

En la Figura 7. Registros eléctricos y posibles SES asociadas al sismo de la Mesa de los Santos (Santander) del 10 de marzo de 2015 (M_w 6,4, $H = 160$ km). Estación CH-06. Filtro pasa bajas $f_c = 0,1$ Hz.

En la Figura 9, la Figura 10 y la Figura 11 se observan los registros eléctricos y magnéticos adquiridos en los cinco (5) canales destinados para ello, de las estaciones USME, TUNJ y VCIO. En verde se marcan las perturbaciones magnéticas (HQx) y eléctricas (HFx).

Como se puede observar, los canales de dipolos eléctricos HQN y HQE no presentan SES identificables a simple vista, lo único que queda claro en este aspecto es que las perturbaciones eléctricas son siempre sobre el nivel DC de la señal. Así mismo, se observa que la señal de la estación USME tiene un bajo nivel de ruido en su canal eléctrico mientras que las estaciones TUNJ y VCIO tienen ruido que alcanza, en ocasiones, 1 [Vpp]; ésta última, en particular, tiene un ciclo definido de 24 horas de alternancia de ruido bajo (12 horas) a ruido alto (12 horas), posiblemente debido a la operación, en cercanías, de algún equipo electromagnético. Fueron obtenidos espectrogramas de los canales de medición de campo eléctrico, que mostraron aleatoriedad de la señal, al no haber picos de amplitud en dB/Hz, con relación a SES u otro tipo de señal diferente del ruido.

Por su parte, los canales magnéticos HFN, HFE y HFZ tienen variaciones de campo magnético relacionadas con la rotación terrestre, con periodo aproximado de 24 horas y pequeñas perturbaciones debidas a ruido cultural (radio, televisión, celulares). Sin embargo hay también perturbaciones que se podrían relacionar a los eventos sísmicos analizados. La Tabla 4 resume las perturbaciones encontradas en los 5 canales de adquisición electromagnética.

De los canales magnéticos no se puede extraer información útil ya que varían muy lentamente en el tiempo y, además, estas señales fueron filtradas por debajo de 0,1 Hz, lo que se traduce en mayor información visible en muy bajas frecuencias.

Tabla 3. Eventos sísmicos considerados para el análisis de precursores en el experimento 2.

Seismic events considered for the experiment 1 precursors analysis.

#	Grupo	Fecha	Hora	Lat	Long	Prof	Mag	Departamento	Municipio
			UTC	[°]	[°]	[km]	[Mw]		
1	A	14/09/2016	01:58:31	7,236	-76,236	0,0	6,1	Antioquia	Mutatá
2		14/09/2016	06:46:59	7,225	-76,304	0,0	4,8	Antioquia	Mutatá
3		14/09/2016	12:02:52	7,206	-76,245	0,0	4,6	Antioquia	Mutatá
4		14/09/2016	15:59:34	7,241	-76,342	0,0	4,7	Antioquia	Mutatá
5	B	22/09/2016	04:32:52	6,817	-73,100	151,4	4,2	Santander	Los santos
6		22/09/2016	10:42:17	6,816	-73,105	156,0	5,0	Santander	Los santos
7	C	31/10/2016	00:20:12	3,405	-74,636	13,2	5,3	Huila	Colombia
8		31/10/2016	02:05:58	3,417	-74,615	0,0	4,8	Huila	Colombia
9	D	16/12/2016	19:45:18	3,431	-74,645	0,0	4,2	Huila	Colombia
10	E	28/12/2016	05:05:05	1,817	-77,077	150	4,8	Cauca	Mercaderes

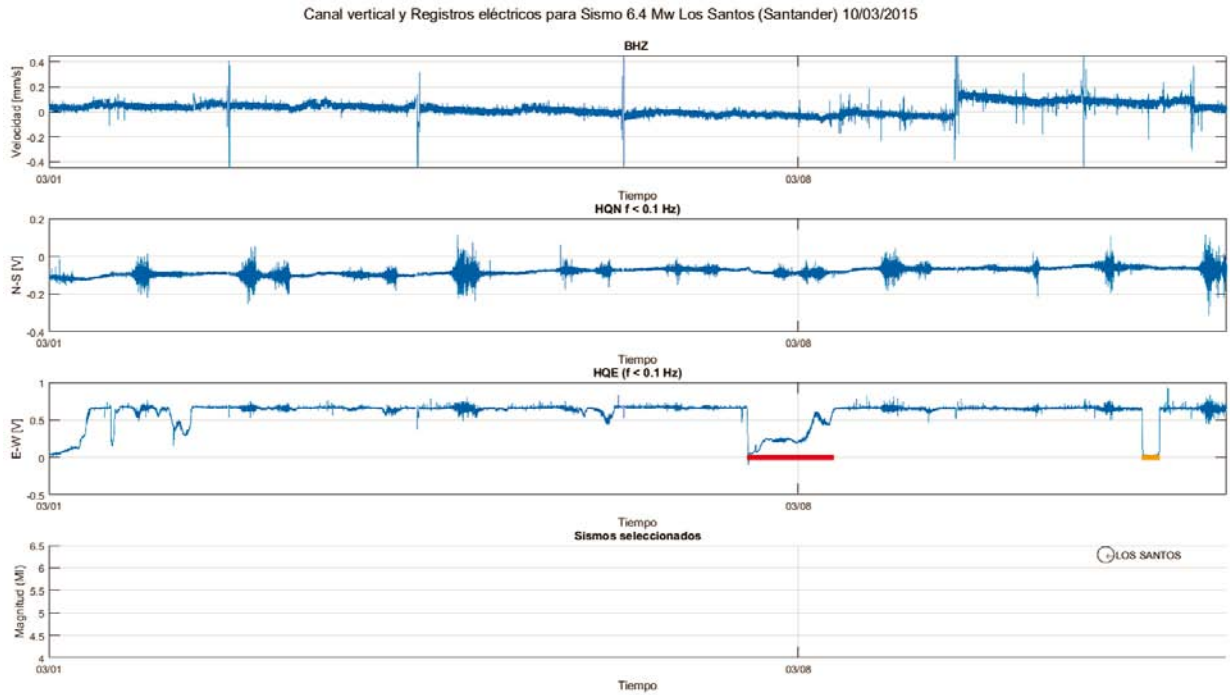


Figura 7. Registros eléctricos y posibles SES asociadas al sismo de la Mesa de los Santos (Santander) del 10 de marzo de 2015 (Mw 6,4, $H = 160$ km). Estación CH-06. Filtro pasa bajas $f_c = 0,1$ Hz.

Electric data an posible asociated SES to the Mesa de los Santos (Santander) seism on March 10th /2015 (Mw 6,4, $H = 160$ km). Station CH-06. Low pass filter $f_c = 0,1$ Hz

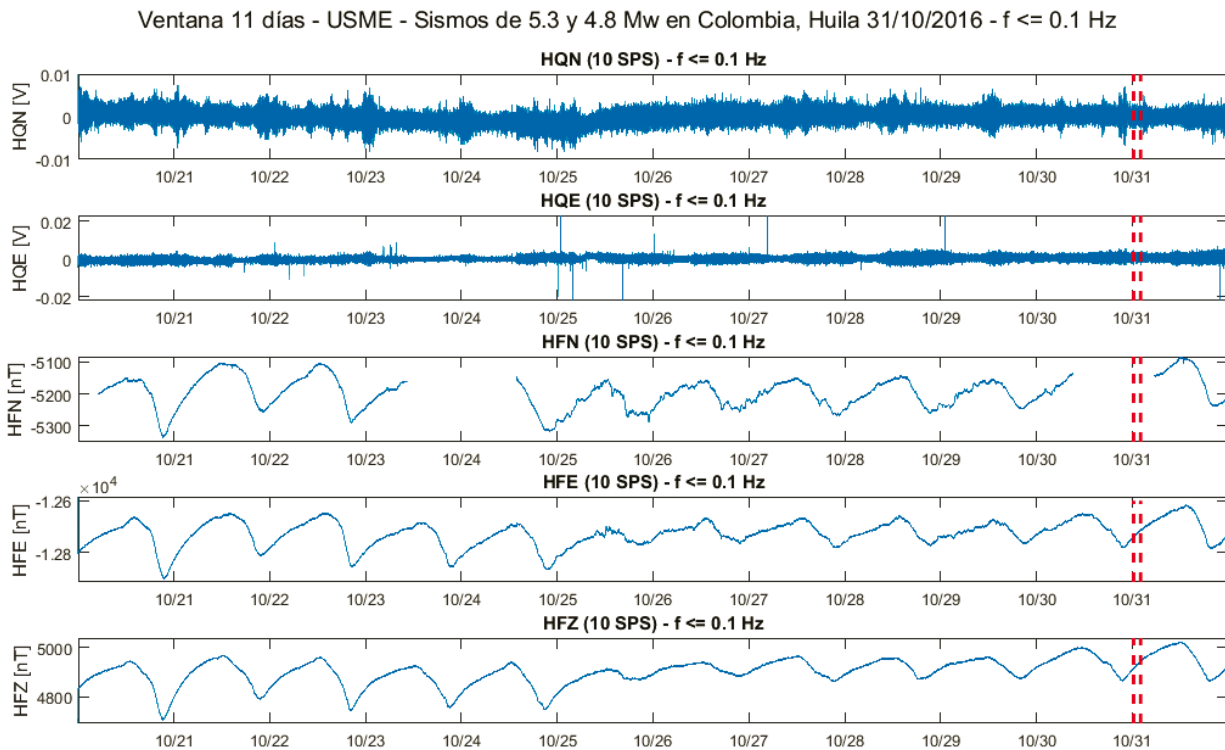


Figura 8. Registros eléctricos y magnéticos, estación USME. Ventana 11 días. Sismos grupo C (líneas rojas de trazos).

Electric and magnetic data, USME station. 11 days window. Group C seisms (discontinuous red lines)

Ventana 11 días - TUNJ - Sismos de 5.3 y 4.8 Mw en Colombia, Huila 31/10/2016 - $f \leq 0.1$ Hz

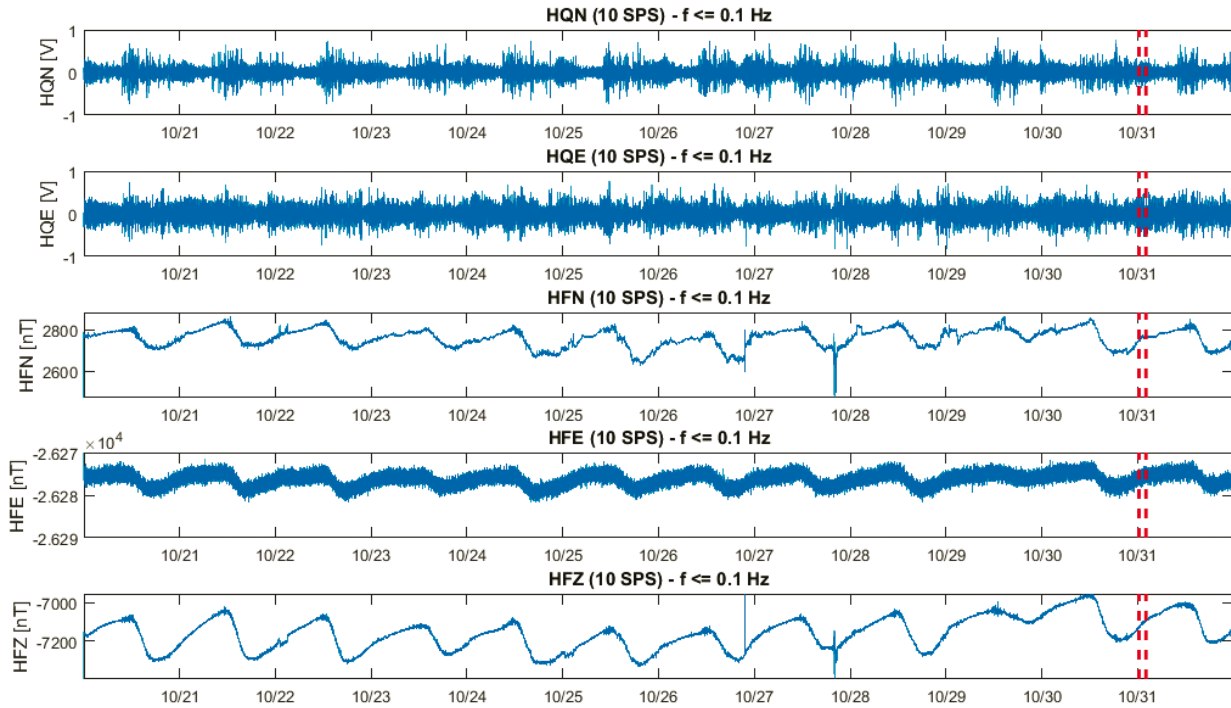


Figura 9. Registros eléctricos y magnéticos, estación TUNJ. Ventana 11 días. Sismos grupo C (líneas rojas de trazos).
Electric and magnetic data, TUNJ station. 11 days window. Group C seisms (discontinuous red lines)

Ventana 11 días - VCIO - Sismos de 5.3 y 4.8 Mw en Colombia, Huila 31/10/2016 - $f \leq 0.1$ Hz

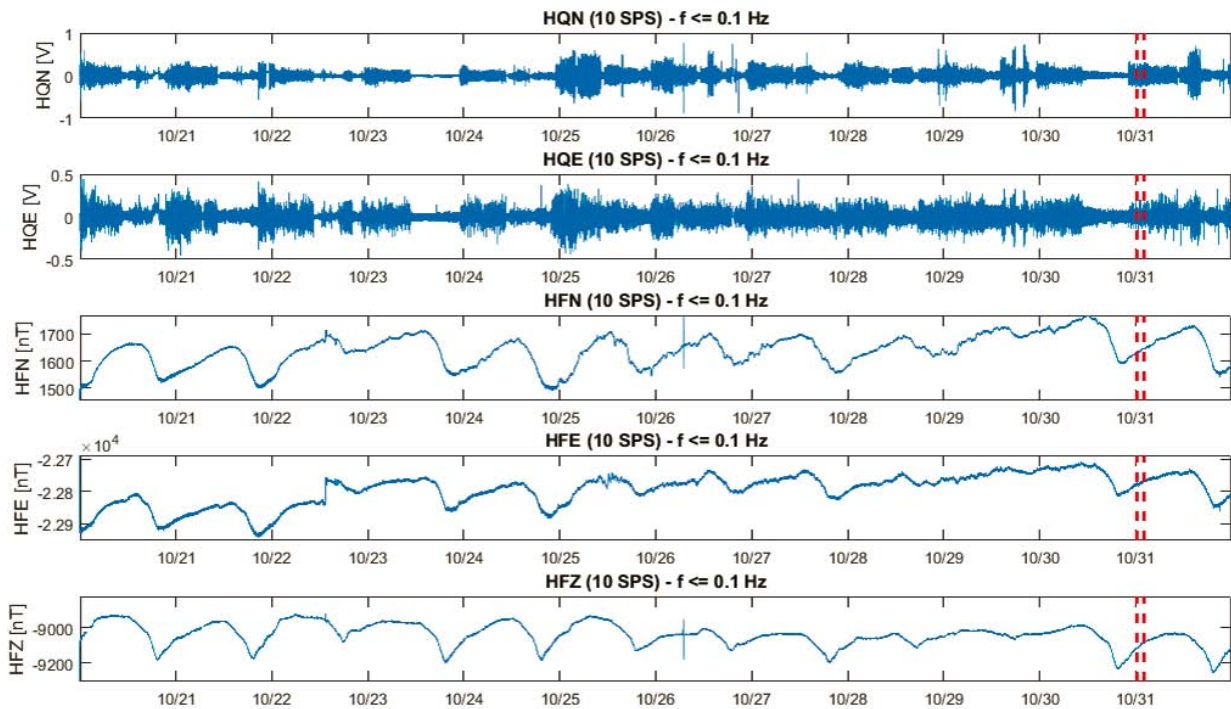


Figura 10. Registros Eléctricos y Magnéticos estación VCIO. Ventana 11 días. Sismos grupo C (líneas rojas de trazos).
Electric and magnetic data, VCIO station. 11 days window. Group C seisms (discontinuous red lines)

Tabla 4. Resumen de perturbaciones eléctricas y magnéticas. Experimento 2.

Perturbación		Grupo de Eventos Sísmicos				
		A	B	C	D	E
SES Única	HQN	No	No	No	No	No
	HQE	No	No	No	No	No
Actividad SES	HQN	No	No	No	No	No
	HQE	No	No	No	No	No
Perturbación Magnética	HFN	9 USME, 1 VCIO	4 USME	4 TUNJ, 1 VCIO	1 USME, 3 TUNJ, 1 VCIO	3 TUNJ
	HFE	9 USME, 1 VCIO	5 USME	No	1 USME, 1 VCIO	No
	HFZ	1 VCIO	No	2 TUNJ, 1 VCIO	1 USME, 1 VCIO	3 TUNJ

DISCUSIÓN

Si bien, en el experimento 2 no se observan SES, sí se observan cambios en la amplitud de baja frecuencia de las señales magnéticas previas a un evento sísmico. Se puede resumir dicho comportamiento como una disminución de la intensidad de campo magnético pico a pico diario y un aumento en el promedio en ese mismo periodo, días antes o casi simultáneamente con la ocurrencia del sismo. Para cada una de las anomalías observadas se duplicó la ventana de tiempo a 22 días con el fin de revisar que no hubiera perturbación similar previa a la ventana de 11 días.

La inspección visual permitiría identificar la presencia o ausencia de más anomalías y, por ende, la posibilidad de que las mismas sirvan de precursor empírico de un evento sísmico. Esto se puede apreciar en la Figura 12, Figura 13, Figura 14 y Figura 15 donde las anomalías siguen siendo únicas para la ventana de 22 días, apoyando la idea de que pueden ser perturbaciones precursoras de eventos sísmicos para dichos eventos y estaciones.

CONCLUSIONES

Las perturbaciones de campo eléctrico detectadas en el suelo mediante dipolos no polarizables (experimento 2) o dipolos de cobre (experimento 1), no permiten establecer una relación de causalidad con relación a eventos sísmicos con $M_w \geq 4,5$ para el periodo evaluado en este estudio. Si bien, la señal obtenida en el canal HQE, en el experimento 1, tiene características similares a las SES descritas por Varotsos et al. (2011), también es evidente que la falta de repetibilidad de dicha señal en el par de electrodos HQN implica que no

se pueden interpretar como SES.

Así mismo, la información obtenida en el experimento 2, arroja resultados no concluyentes en cuanto al comportamiento de las perturbaciones de campo eléctrico. Esto aplica tanto para SES únicas, como para actividades de SES. Por esta razón, en este trabajo y para la ventana analizada, no es posible asociar unas variaciones de la señal eléctrica, en calidad de precursor, a los sismos seleccionados para el estudio.

Sin embargo, la información obtenida de los sensores magnéticos de las tres estaciones, en algunos canales o, en otros casos, en todos los canales, permite evidenciar no sólo las variaciones del campo magnético como resultado de la rotación terrestre, sino que también es posible identificar pequeñas perturbaciones que podrían estar asociadas a eventos sísmicos. Las perturbaciones más interesantes son las que se evidencian en algunas estaciones, previas a ciertos sismos en las que la señal asociada a la rotación terrestre sufre una disminución en su amplitud pico a pico y un aumento en su promedio. Si bien estas asociaciones de alteraciones en el campo magnético a determinado evento sísmico son meramente empíricas, un estudio a largo plazo podría ser más indicativo sobre la posible presencia de precursores magnéticos detectables por las estaciones multi-paramétricas de la RSSB.

De esta manera, tomando en consideración lo anteriormente expuesto, es prudente concluir que en este trabajo no ha sido identificada evidencia clara de precursores eléctricos, ni magnéticos de eventos sísmicos, a pesar de haberse detectado perturbaciones en dichas señales.

Ventana 22 días - VCIO - Sismos de 6.1, 4.8, 4.6 y 4.7 Mw en Mutatá, Antioquia 14/09/2016 - $f \leq 0.1$ Hz

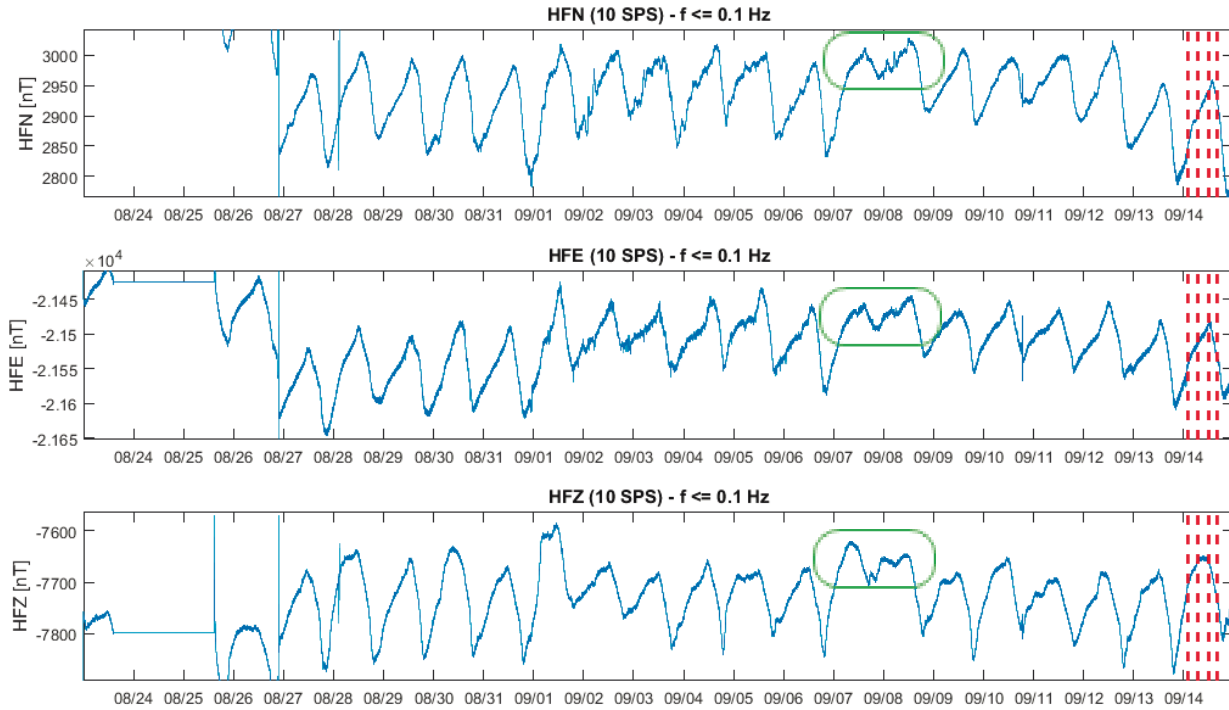


Figura 11. Anomalías de amplitud de baja frecuencia (en verde) previo al sismo de Mw6.1, del grupo A. Estación VCIO. Ventana de 22 días.
Low frequency amplitude anomalies (on green) before the group A Mw6.1 seism. Station VCIO. 22 days window.

Ventana 11 días - USME - Sismos de 5.0 y 4.2 Mw en Los Santos, Santander 22/09/2016 - $f \leq 0.1$ Hz

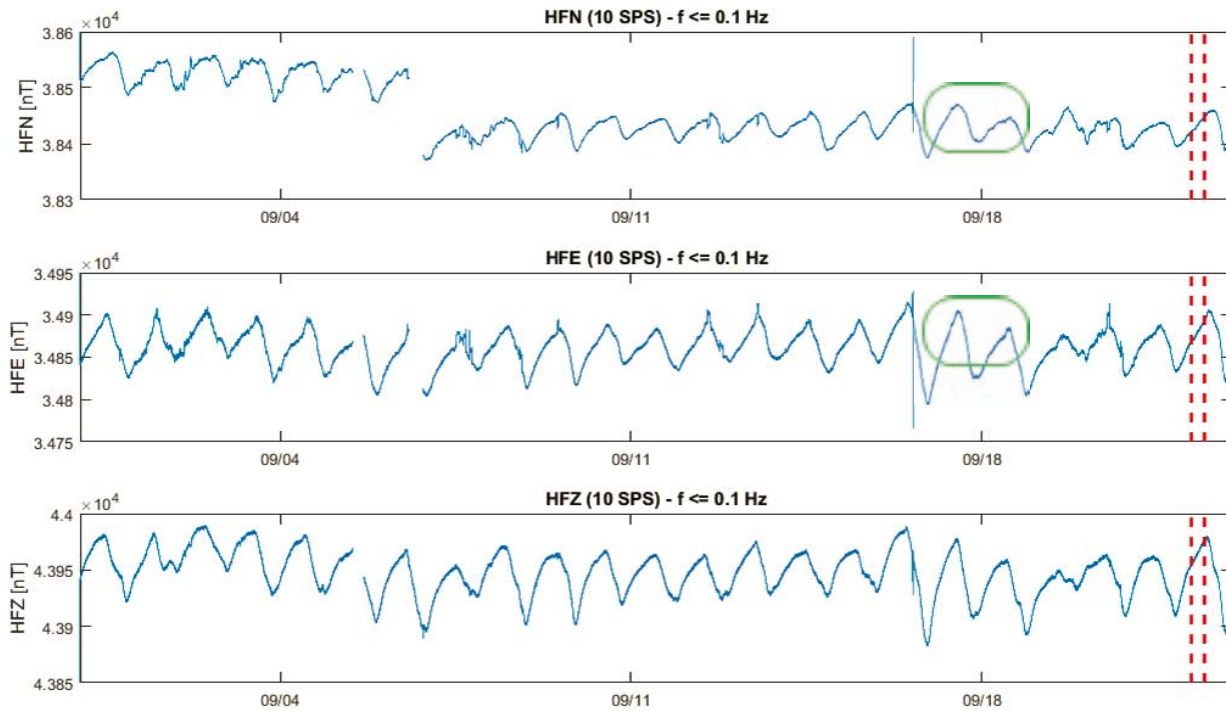


Figura 12. Anomalías de amplitud de baja frecuencia (en verde) previo a los sismos del grupo B. Estación USME. Ventana de 22 días.
Low frequency amplitude anomalies (on green) before the group B seisms. Station USME. 22 days window.

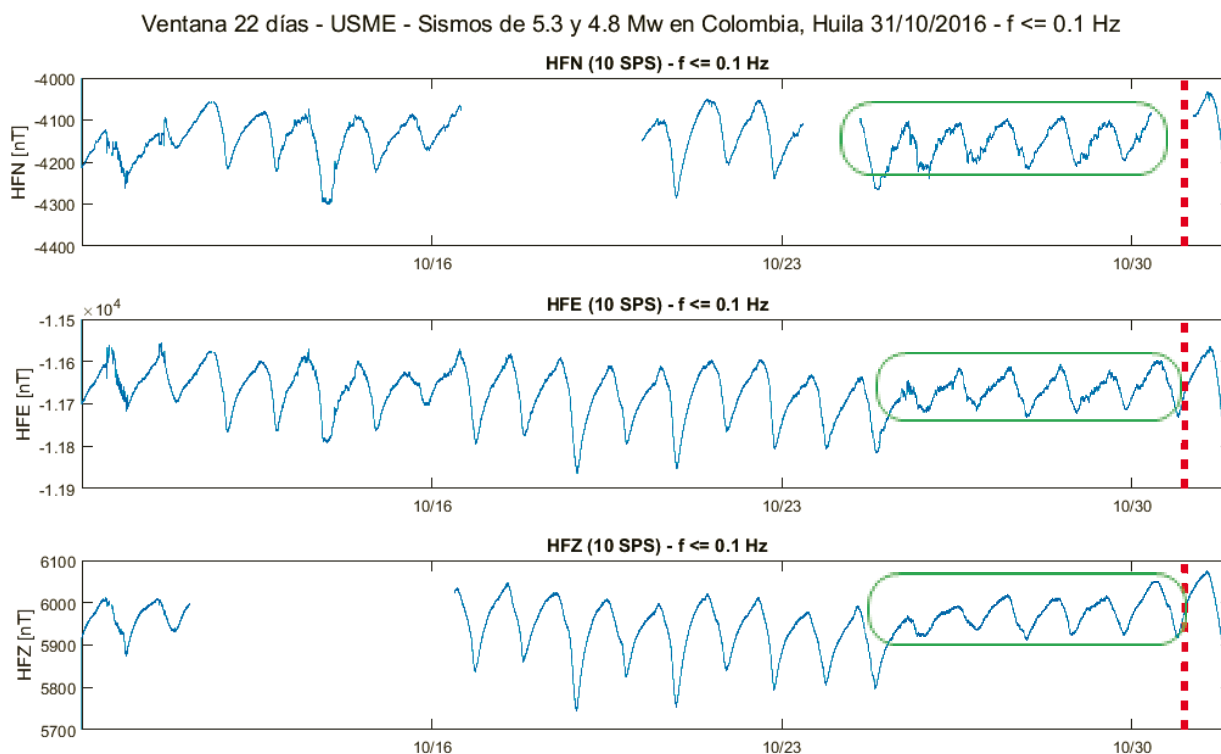


Figura 13. Anomalías de amplitud de baja frecuencia (en verde) previo a los sismos del grupo C. Estación USME. Ventana de 22 días.
Low frequency amplitude anomalies (on green) before the group C seisms. Station USME. 22 days window.

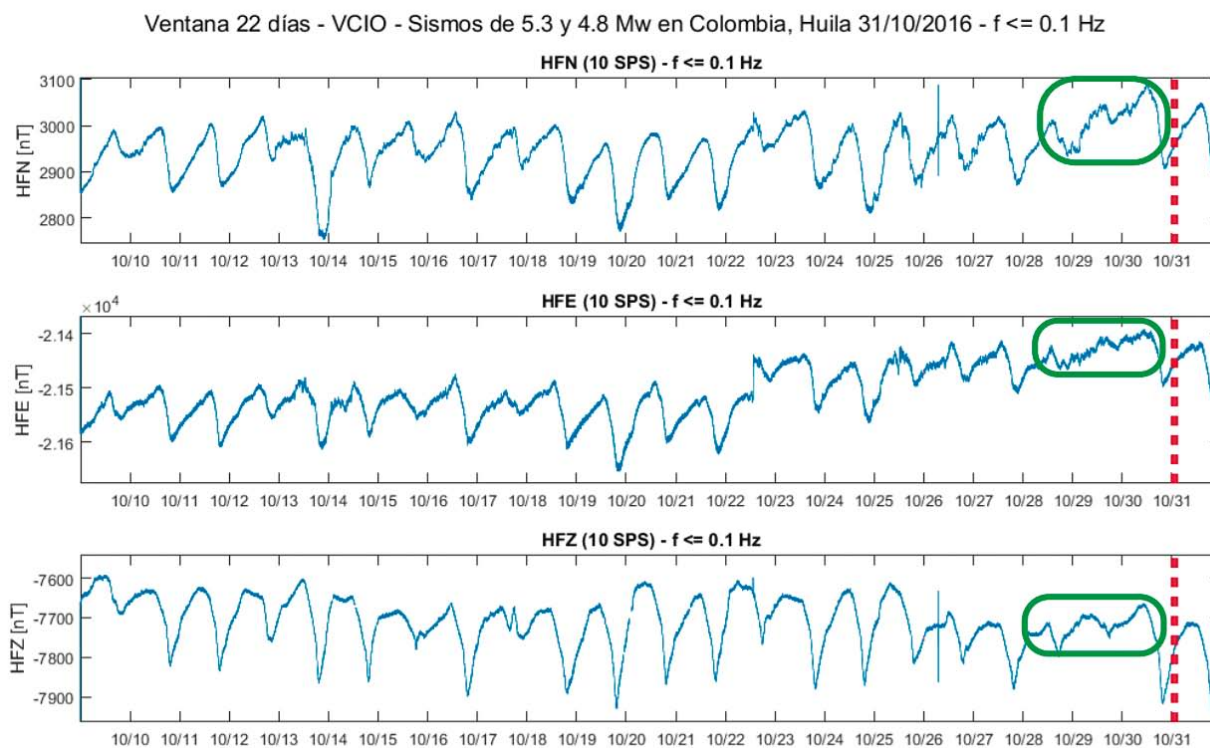


Figura 14. Anomalías de amplitud de baja frecuencia (en verde) previo a los sismos del grupo C. Estación VCIO. Ventana de 22 días.
Low frequency amplitude anomalies (on green) before the group C seisms. Station VCIO. 22 days window.

AGRADECIMIENTOS

Los autores deseamos expresar nuestros agradecimientos a la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá y a la Universidad Antonio Nariño, ya que, sin su apoyo, cofinanciación y colaboración mutua, no hubiera sido posible mantener en funcionamiento la Red Sismológica de la Sabana de Bogotá.

De igual manera, queremos destacar la cofinanciación del proyecto de la RSSB por parte del Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia –COLCIENCIAS, para el despliegue instrumental de la RSSB (código de proyecto 1233-569-35004; convenio 0361-2013).

BIBLIOGRAFÍA

- Ahern, T. K., Casey, R., Barnes, D., Benson, R., & Knight, T. (2014). Seed Reference Manual. Philadelphia: International Database Systems.
- Cicerone, R., Ebel, J., & Briton, J. (2009). A Systematic compilation of earthquakes precursors. *Tectonophysics*, 479, 371-396.
- Clavijo Ramírez, J. E., & Sánchez, J. J. (2016). Fenómenos electromagnéticos asociados con terremotos. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- CME. (2016). Broadband Seismometer Model CME-4111. Retrieved from http://r-sensors.ru/8_seismometers.shtml#compact
- Dologlou, E. (2008). Possible relationship between Seismic Electric Signals (SES) lead time and earthquake stress drop. *Proc. Jpn. Acad. Ser. B Phys. Biol. Sci.*, 84(4), 117-122.
- Garmin International Inc. (2011). GPS 18x technical specifications. Retrieved from http://static.garmin.com/pumac/GPS_18x_Tech_Specs.pdf
- Johnston, M. J. (1997). Review of Electric and Magnetic Fields Accompanying Seismic and Volcanic Activity. *Surveys in Geophysics*, 18(5), 441-476.
- Park, S. K. (1996). Precursors to earthquakes: Seismoelectromagnetic signals. *Surveys in Geophysics*, 17(4), 493-516. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/BF01901642>
- Solano-Fino, J. M. (2017). Correlación entre señales EM y eventos sismológicos de la Sabana de Bogotá y alrededores para establecer la existencia de precursores sísmicos (Tesis de Maestría). 82 p. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias.
- Tiampo, K. F., & Shcherbakov, R. (2012). Seismicity-based earthquake forecasting techniques: Ten years of progress. *Tectonophysics*, 522-523, 89-121.
- Uyeda, S., Al-Damegh, K., Dologlou, E., & Nagao, T. (1999). Some relationship between VAN seismic electric signals (SES) and earthquake parameters. *Tectonophysics*, 304, 41-55.
- Varotsos, P. (1984). Physical properties of the variations of the electric field of the Earth preceding earthquakes. *Tectonophysics*, 110, 73-98.
- Varotsos, P. A., Sarlis, N., & Skordas, E. (2006). On the recent advances in the study of seismic electric signals (VAN method). *31(4-9)*, 189-197.
- Varotsos, P. A., Sarlis, N., & Skordas, E. (2011). *Natural Time Analysis: The New View of Time: Precursory Seismic Electric Signals, Earthquakes and other Complex Time Series*. Springer.
- Varotsos, P., Alexopoulos, K., & Lazaridou, M. (1993). Latest aspects of earthquake prediction in Greece based on seismic electric signals. *Tectonophysics*, 224(1-3), 1-37.