



EL SISMO DE MESETAS - META DEL 24 DE DICIEMBRE DE 2019
Aspectos sismológicos, movimiento fuerte y consideraciones geodésicas

Bogotá D.C., marzo de 2020



**El futuro
es de todos**

Minenergía

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO ©

Oscar Paredes Zapata

Director General

Marta Lucía Calvache

Director Técnico de Geoamenazas

Viviana Dionicio Lozano

Coordinadora Red Sismológica Nacional

AUTORES

Edwin Mayorga López

Viviana Dionicio Lozano

Miguel Lizarazo Calderón

Patricia Pedraza García

Esteban Poveda Núñez

Omar Mercado Díaz

Daniel Siervo Plata

Lina Aguirre López

Ruth Emilse Bolaños

Fernando Garzón Varón

Laura Velásquez Rocha

Luisa Fernanda Castillo

Helber García

Elizabeth Mazo

Mónica Arcila Rivera

Diana Rocío Barbosa

Ana Milena Sarabia

Myriam López C

Fernando Díaz Parra

Jairo Valcárcel Torres

Jhon Leandro Pérez

Miguel Cubillos Fajardo

Jonnathan Fandiño

Daniel Martínez Jaramillo

Emmanuel Castillo Taborda

Leonardo Mateus Báez

Oscar Suárez Mejía

Ángel Agudelo González

Lina Pérez García

Javier Idárraga García

Nelson Ricardo López

Héctor Mora Páez

Yuli Andrea Corchuelo C

Leidy Sorany Giraldo L

Eliana Gómez Hurtado

Olga Patricia Bohórquez O

Citación: Mayorga, E., Dionicio, V., Lizarazo, M., Pedraza, P., Poveda, E., Mercado, O., Siervo, D., Aguirre, L., Bolaños, R., Garzón, F., Velásquez, L., Castillo, L., García, H., Mazo, E., Arcila, M., Barbosa, D., Sarabia, A., López, M., Díaz, F., Valcárcel, J., ... Bohórquez, O. (2020). *EL SISMO DE MESETAS, META DEL 24 DE DICIEMBRE DE 2019 Aspectos sismológicos, movimiento fuerte y consideraciones geodésicas*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

CONTENIDO

RESUMEN	4
ABSTRACT	5
1. INTRODUCCIÓN	8
2. SECUENCIA DE RÉPLICAS	9
3. MARCO SISMOTECTÓNICO	12
4. MECANISMOS FOCALES Y TENSORES MOMENTO SÍSMICO	16
5. MOVIMIENTO FUERTE	22
6. SISMICIDAD HISTÓRICA EN LA REGIÓN	30
7. EVALUACIÓN DE INTENSIDADES A PARTIR DE LOS REPORTES RECIBIDOS VÍA INTERNET	34
8. MAPAS DE INTENSIDADES INSTRUMENTALES	42
9. ANÁLISIS GEODÉSICO DE POSICIONAMIENTO	46
CONCLUSIONES	53
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

RESUMEN

El 24 de diciembre de 2019 a las 14:03:55 hora local, se presentó un sismo de magnitud M_w 6,0 con epicentro en Mesetas (Meta), localizado por la red sismológica del Servicio Geológico Colombiano (SGC) en las coordenadas $3,462^\circ$ N, $74,1840^\circ$ W a una profundidad de 13 km. Este evento fue sentido en gran parte del territorio colombiano, sin causar daños materiales considerables.

Entre el 24 de diciembre de 2019 y el 24 de enero de 2020, la red sismológica registró y localizó cuatrocientos veintiséis (426) réplicas de magnitud $M > 2,0$, la mayor de M 5,8 se generó 16 minutos después del sismo principal, y produjo alarma entre la población. Las réplicas, vistas en planta, marcan una región epicentral de aproximadamente 15 km^2 . El número de réplicas decae de manera exponencial con el tiempo.

La aceleración máxima se registró en la componente vertical de la estación de Lejanías, Meta –CLEJA– con un valor de $261,24 \text{ cm/s}^2$, a 19 km de distancia del epicentro; la aceleración horizontal media registrada en esta misma estación fue de $185,89 \text{ cm/s}^2$, caracterizada por movimiento de rumbo con componente inversa. La estación de La Uribe, Meta –URMC–, a 31 km del epicentro, registró una aceleración horizontal media de $160,77 \text{ cm/s}^2$ y vertical de $61,59 \text{ cm/s}^2$. Las estaciones La Macarena, Meta –MACC– y San José del Guaviare, Guaviare –GUA– a 150 y 200 km de distancia del epicentro respectivamente, registraron aceleraciones superiores a la registrada en la estación de Villavicencio, Meta –VIL–, a 92 km del epicentro; esto indica la presencia de efecto del sitio en donde están instaladas estas estaciones. Las réplicas registraron un comportamiento similar en la aceleración vertical de la estación de Lejanías, lo cual es asociado con la cercanía y ubicación de la estación con respecto a la fuente.

La evaluación de la intensidad macrosísmica del sismo se hizo según la Escala Macrosísmica Europea (EMS-98), por medio del formulario web sismosentido.sgc.gov.co y formularios análogos, a partir de los cuales se obtuvo la intensidad máxima del evento principal correspondiente a 6 –daño leve–, que indica que fue sentido fuerte, algunas personas perdieron el equilibrio, hubo vibración y caída de objetos y se reportaron daños leves no estructurales, como grietas en muros y caída de partes del revestimiento. Dicha intensidad fue evaluada en municipios cercanos al epicentro como Fuente de Oro, Puerto Concordia, El Dorado, Lejanías, Villavicencio y Mesetas en el departamento del Meta. También se evaluó la intensidad macrosísmica de 48 réplicas, cuyas magnitudes se encuentran entre 2,1 y 5,8.

La intensidad instrumental se calculó a partir de las máximas aceleraciones y velocidades medidas en los sensores que registraron el evento. La Escala de Mercalli - modificada (MMI),

permitió relacionar el movimiento pico del suelo (PGM) con el cómo se sintió el sismo y la distribución de los posibles daños o efectos del mismo. El máximo valor de intensidad instrumental calculado fue 6, coincidiendo con la máxima intensidad macrosísmica reportada.

Las estaciones geodésicas (GPS) permanentes de operación continua, ubicadas alrededor del epicentro a distancias entre 133 km y 177 km, no evidenciaron cambios posicionales asociados al sismo. Adicionalmente, se estimaron las formas de onda de desplazamiento en la posición de las antenas en las estaciones GPS a partir del cálculo de posicionamiento cinemático (*Precise Point Positioning*), observándose variaciones del orden de centímetros, las cuales se consideran resultados típicos, medidos sin la ocurrencia de sismos.

El sismo del 24 de diciembre de 2019 ocurrió en la Falla de Algeciras por un desplazamiento hacia la derecha en el sentido del rumbo con componente inverso, justo en la zona de transferencia con el Sistema de Fallas de Guaicáramo. En esta zona se ha documentado una gran estructura duplex transpresiva formada en el escalón izquierdo entre ambos sistemas. Estas fallas conforman un sistema regional de orientación nororiente-suroccidente, que afecta la parte oriental de la región Andina, desde la frontera sur del país, en el Macizo Colombiano, hacia el extremo norte del piedemonte llanero. Gran parte de la sismicidad registrada en la Cordillera Oriental, entre los municipios de Garzón y Lejanías, ocurre en este sistema de fallas. Los parámetros de fuente calculados para el sismo principal y sus mayores réplicas registradas entre el 24 y el 27 de diciembre, evidencian la componente principal dextral y subordinada inversa de esta fuente sismogénica activa.

ABSTRACT

On December 24, 2019 at 14:03:55 local time, an earthquake of magnitude Mw 6.0 was presented with epicenter in Mesetas (Meta), located by the seismological network of the Colombian Geological Service (SGC) at coordinates 3.461 ° N, 74.1840 ° W with depth of 13 km. This event was felt in a large part of the Colombian territory, without causing considerable material damage.

Between December 24, 2019 and January 24, 2020, the seismological network registered and located four hundred twenty six (426) aftershocks of magnitude $M > 2.0$, the largest being 5.8 that was generated 16 minutes after the main earthquake, which was also felt and produced alarm among the population. Aftershocks, seen on the surface, are distributed in an area around the epicenter of approximately 10 km². The number of aftershocks decays exponentially with time.

The maximum acceleration was recorded in the vertical component of the station Lejanías, Meta - CLEJA with a value of 261.24 cm/s^2 , 19 km away from the epicenter; the average horizontal acceleration recorded in that station was 185.89 cm/s^2 , characteristic of strike-slip movement with inverse component. The La Uribe station, Meta - URM, 31 km away from the epicenter, registered an average horizontal acceleration of 160.77 cm/s^2 and a vertical acceleration of 61.59 cm/s^2 . The stations La Macarena, Meta - MACC and San José del Guaviare, Guaviare - GUA at 150 and 200 km away from the epicenter respectively, recorded accelerations higher than those at Villavicencio, Meta - VIL station, at 92 km from the epicenter, this indicates the presence of site effects where those stations are located. The aftershocks recorded a similar behavior in the vertical acceleration on Lejanías station, which is associated with the proximity and location of the station with respect to the source.

The evaluation of the macroseismic intensity of the earthquake was done according to the European Macroseismic Scale (EMS-98), through the web form sismosentido.sgc.gov.co and analog forms, from which was obtained the maximum intensity of the main event corresponding to 6 -Light damage-, which indicates that it was felt strong, some people lost their balance, there was vibration and falling objects and light non-structural damage was reported. This intensity was evaluated in municipalities near the epicenter such as Fuente de Oro, Puerto Concordia, El Dorado, Lejanías, Villavicencio y Meseta in the Meta department. The same way, the macroseismic intensity of 48 replicates was evaluated, whose magnitudes are between 2.1 and 5.8.

The instrumental intensity is calculated, based on the maximum accelerations and velocities measured in the sensors that recorded the event, the Modified Mercalli Scale (MMI) is used, which allows the peak ground movement (PGM) to be related to how the earthquake was felt and the distribution of possible damage or effects thereof. The maximum value of instrumental intensity is 6, coinciding with the maximum intensity reported.

The permanent geodesic stations (GPS) of continuous operation, located around the epicenter at distances between 133 km and 177 km, do not show positional changes associated with the earthquake. Additionally, the displacement waveforms in the position of the antennas in the GPS stations were estimated from the calculation of kinematic positioning (Precise Point Positioning), observing variations of the order of centimeters, they are considered typical results, measured without the occurrence of earthquakes.

The earthquake of December 24, 2019 happened by a right strike-slip displacement with reverse component of the Algeciras Fault, just in the transfer zone with the Guaicáramo Fault System. In this zone has been documented a big transpressive duplex structure, developed on the left step between both systems. These faults shape a northeast-southwest regional system, which affects the eastern part of the Andean region, from the

southern border of the country, in the Colombian Massif, towards the northern end of the eastern foothills. A large part of the seismicity registered in the Cordillera Oriental, between the Garzón and Lejanías municipalities take place in this fault system. The source parameters, calculated for the main earthquake and its largest aftershocks recorded between December 24 and 27, evidence the main right strike-slip and subordinate reverse component of this active seismogenic source.

1. INTRODUCCIÓN

El 24 de diciembre de 2019 a las 14:03:55 hora local, en Mesetas - Meta se presentó un sismo con magnitud M_w 6,0, localizado por el Servicio Geológico Colombiano en las coordenadas $3,461^\circ$ N / $74,184^\circ$ W (sistema de coordenadas geográficas WGS84) y 13 kilómetros de profundidad. Luego de la ocurrencia de este sismo, como proceso normal, se intensificó la actividad sísmica en la región, presentándose varios sismos sentidos principalmente en los departamentos de Meta, Tolima, Huila, Cauca, Cundinamarca, Risaralda, Quindío, Caldas y Boyacá, con magnitudes entre 2,2 y 5,8.

En la caracterización de este evento, el presente documento aborda la distribución temporal y espacial de las réplicas asociadas a este sismo, así mismo una contextualización del marco sismotectónico de Colombia y específicamente del área afectada, resaltando que a la Falla de Algeciras se le atribuye gran parte de la sismicidad registrada en esta región, relacionando algunos sismos históricos bajo la misma influencia tectónica que desató el sismo del 24 de diciembre de 2019.

Para la identificación del movimiento de la fuente se utilizaron diferentes metodologías, que permitieron asociar el tipo de movimiento con las características del sistema de fallas de Algeciras. El documento abarca también el análisis de las aceleraciones medidas en las estaciones acelerográficas y sismológicas, tanto del evento principal como de sus réplicas principales.

Se presenta la evaluación de la intensidad macrosísmica del evento, teniendo en cuenta los reportes hechos por la población, encontrando similitud con los mapas de intensidades instrumentales obtenidos por los valores máximos de aceleración del registro de las estaciones. Por último se exponen las medidas geodésicas tomadas en las estaciones permanentes del Servicio Geológico Colombiano (GIGE-GeoRED).

Es importante resaltar que la ocurrencia de esta secuencia sísmica no originó daños materiales notorios, según reporte de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres “Guillermo Escobar, Subdirector para el Manejo de Desastres de la #UNGRD entrega reporte de normalidad en el país tras los eventos sísmicos presentados el día de ayer en el mpio de Mesetas, Meta y sentidos en todo el territorio nacional. @infopresidencia” (UNGRD, 2019).

2. SECUENCIA DE RÉPLICAS

Después del sismo principal, como un proceso normal de acomodación de la Tierra, se generó un gran número de réplicas. La distribución espacial de las réplicas se localiza entre los municipios de La Uribe, Mesetas y Lejanías -Meta, sobre una sección documentada de la Falla Algeciras (Falla Algeciras-Balsillas), en dirección SW-NE sobre esta (figura 1). Las réplicas, vistas en planta, se distribuyen en un área aproximadamente de 15 km² alrededor del epicentro.

La figura 2, muestra la distribución de magnitud para los eventos generados en Mesetas - Meta y zonas aledañas, luego del sismo de Mw 6,0 (2019-12-24 14:03 hora local), para sismos con Magnitud (M) mayor o igual a 2,0. Entre el 24 de diciembre de 2019 a las 14:00 y el 24 de enero de 2020 a las 23:59:59 hora local, se contabilizaron cuatrocientos veintiséis (426) sismos localizables ($M > 2,0$), de los cuales setenta (70) con magnitud entre 3,0 y 4,0, quince (15) con magnitud entre 4,0 y 5,0, uno (1) con magnitud entre 5,0 y 6,0 (2019-12-24 14:19 hora local, Mw 5,8) y uno (1) de magnitud 6,0 (evento principal).

La figura 3, muestra la distribución temporal de la generación de sismos luego de la ocurrencia del sismo principal el día 24 de diciembre a las 14:03 hora local, organizada por días, siendo los dos primeros días, 24 y 25 de diciembre, en los cuales se registraron más de 210 eventos, con $M \geq 2,0$, posteriormente el número de réplicas decae de manera exponencial con el tiempo.

El sismo de Mesetas - Meta del 24 de diciembre de 2019. Aspectos sismológicos, movimiento fuerte y consideraciones geodésicas

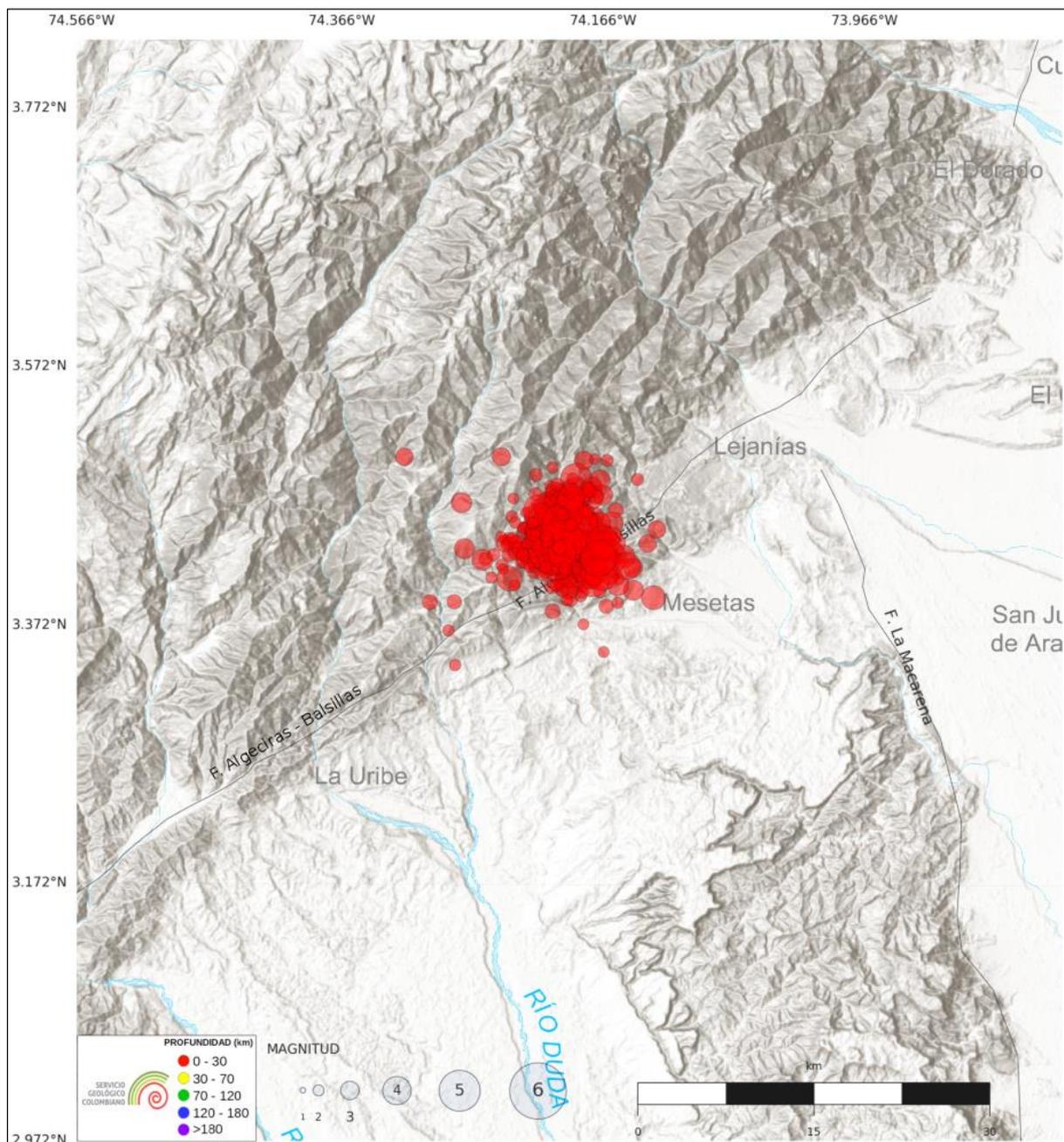


Figura 1. Localización de sismos con $M > 2,0$ en el área de Mesetas – Meta
Sismos entre 2019-12-24 14:03 y 2020-01-24 23:59 hora local
Fuente: autores

El sismo de Mesetas - Meta del 24 de diciembre de 2019. Aspectos sismológicos, movimiento fuerte y consideraciones geodésicas

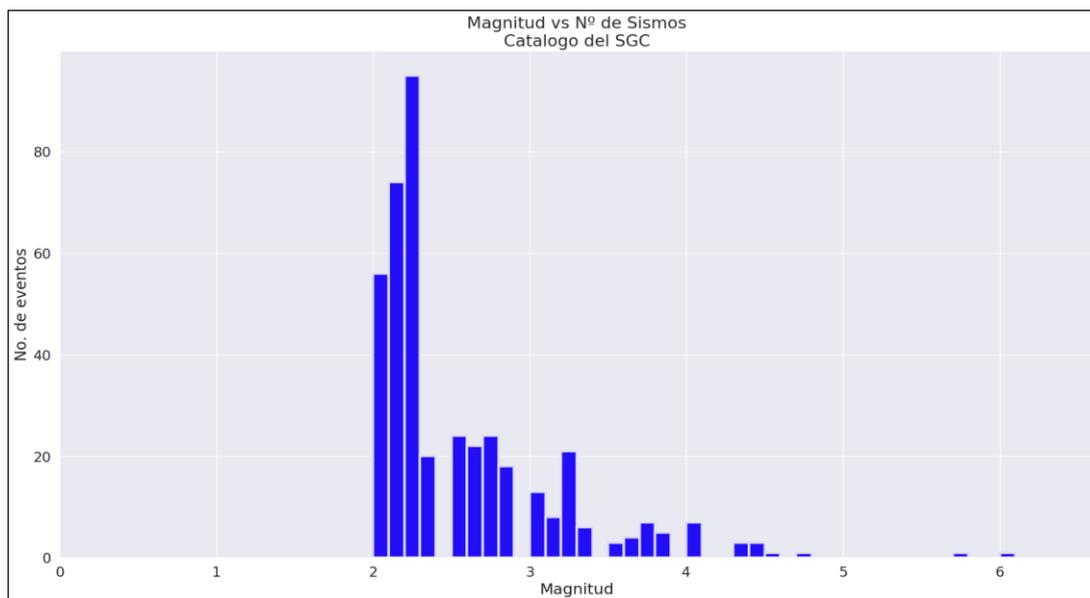


Figura 2. Distribución de magnitud para los eventos localizados en Mesetas – Meta sismos luego del sismo de Mw 6,0 (2019-12-24 14:03 hora local), con Magnitud $\geq 2,0$
Fuente: autores

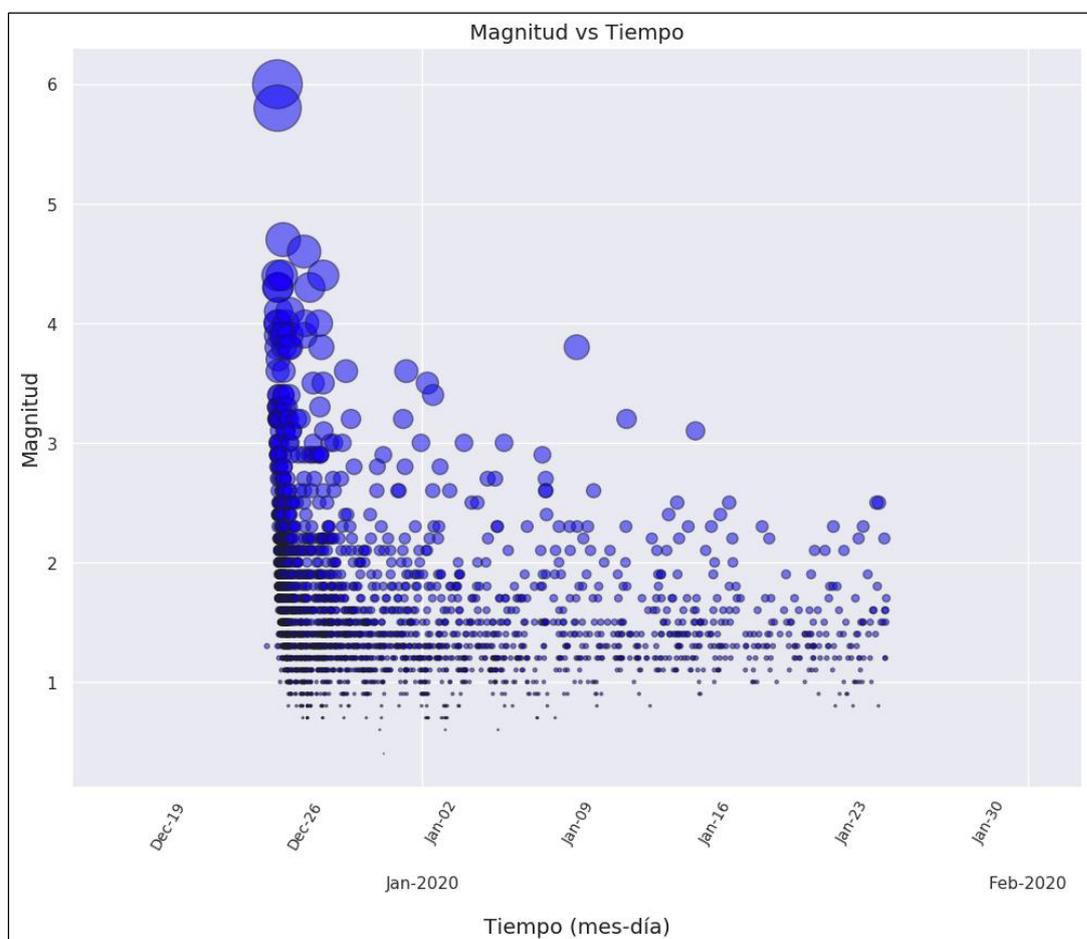


Figura 3. Distribución temporal de la generación de sismos
Datos entre el 24 de diciembre de 2019 y 24 de enero de 2020
Fuente: autores

3. MARCO SISMOTECTÓNICO

El marco tectónico colombiano involucra la subducción de la placa Nazca bajo la placa Sudamericana, la influencia de la placa Caribe, la colisión del bloque Panamá-Chocó (Farris et al., 2011) y sistemas de fallas intracontinental con tendencia NE a lo largo de la región andina (Veloza et al, 2012). En Colombia las fuentes sismogénicas no se restringen a las zonas de subducción sino también a fuentes de corteza generadoras de sismos someros, como es el caso de la secuencia sísmica de diciembre de 2019 en Mesetas –Meta–, localizado en el piedemonte de la Cordillera Oriental, en la que se han documentado tres grandes sismos históricos con profundidades menores a 50 kilómetros: Mw 7,1 el 12 de julio de 1785, Mw 6,7 el 31 de agosto de 1917 y Mw 7,0 el 9 de febrero de 1967. La sismicidad en esta zona se atribuye a procesos de deformación y acomodación en el Bloque Norandino, considerado por varios modelos regionales (Pennington, 1981; Kellogg et al., 1985; Trenkamp et al., 2002; Mora-Páez et al. 2019) como un bloque tectónico que se mueve hacia el NE con respecto a la Placa Suramericana. En Colombia este bloque corresponde aproximadamente al segmento occidental del país, cuyo límite es el flanco oriental de la cordillera oriental (Veloza et al, 2012). Mora-Páez et al. (2019) basados en estaciones de funcionamiento continuo de GPS de GeoRED del SGC y estaciones adicionales en Panamá, Ecuador y Venezuela, estimaron el movimiento del bloque Norandino con rumbo N60°E a una velocidad de 8,6 mm/año con respecto a la placa Suramericana. Coney y Evenchick, (1994) señalan que el movimiento transpresivo dextral entre el Bloque Norandino y la Placa Suramericana actúa desde el Pleistoceno.

El Sistema de Fallas del Frente Oriental (Page, 1986; París, Machette, Dart y Haller, 2000), también referido como Sistema de Fallas del Frente Oriental Andino (SFOA) (Ego, Sébrier, Lavenu, Yepes y Egues, 1996), ha sido definido como el conjunto de fallas que representa el límite entre los Andes de Colombia y los Llanos Orientales en las cuencas de los ríos Orinoco y Amazonas. Además, estos autores lo consideran como la continuación al SW del Sistema de Fallas de Boconó de Venezuela hacia el golfo de Guayaquil en Ecuador, marcando el límite entre la Placa Suramericana y el Bloque Norandino. En Colombia, el SFOA cambia su carácter cabalgante con vergencia oriental en el norte, a casi exclusivamente transcurrente dextral hacia el sur, donde cruza oblicuamente la Cordillera Oriental (Diederix y Romero, 2008).

El Sistema de Fallas de Algeciras (SFA) integra el conjunto de fallas geológicas de carácter regional con orientación general NE-SW, que se extiende desde la frontera con Ecuador hasta unirse con el Sistema de Fallas de Guaicáramo en el flanco oriental de la Cordillera Oriental de Colombia (Velandia, Acosta, Terraza y Villegas, 2005). En la literatura, el SFA ha recibido múltiples nombres de acuerdo con los sitios que cruza, tales como Sistema de Fallas de Garzón-Suaza (Butler, 1983; Butler y Schamel, 1988); Falla de Algeciras (París y Romero,

1994); Falla de Garzón (Chorowicz, Chotin y Guillande, 1996); Secciones (fallas) de Algeciras, Garzón-Pitalito y Suaza (París *et al.*, 2000); Sistema de Fallas Algeciras-Garzón (Montes, Sandoval y Vergara, 2001); y Sistema de Fallas de Suaza (Cediel, Shaw y Cáceres, 2003). En este trabajo se adopta el nombre de Sistema de Fallas de Algeciras siguiendo la denominación de Velandia *et al.* (2005).

De acuerdo con Cediel *et al.* (2003), el Sistema de Fallas de Suaza (nombre equivalente al SFA), corresponde al segmento sur de la sutura continente-continente que marca la orogenia Grenviliana (Orinoco), la cual es el resultado de la colisión de Norteamérica con la región del Escudo de Guyana de Sudamérica hace aproximadamente 1200 Ma. Durante el Mesozoico (principalmente en el Triásico-Jurásico y Aptiano-Albiano Temprano) estas estructuras pudieron estar involucradas en la génesis de una serie de cuencas tipo graben en el Valle Superior del Magdalena, tiempo en el cual probablemente fueron activas como un sistema de fallas de rumbo o transtensional (Sarmiento-Rojas, Van Wess y Cloetingh, 2006). Posteriormente, el sistema se reactivó a principios del Mioceno cuando comenzó la expansión de las placas Cocos y Nazca (hace 23 Ma), y esta última inició su proceso de subducción por debajo de Suramérica (Butler, 1983; Lonsdale, 2005). Esto llevó a la exhumación del Macizo de Garzón a partir de 12,5 Ma aproximadamente, con el máximo entre 6-3 Ma, por medio de fallas de cabalgamiento (Anderson *et al.*, 2016). Después, al menos desde hace 2 Ma, el SFA comenzó a acomodar el movimiento de rumbo dextral dominante que exhibe en la actualidad (Anderson *et al.*, 2016).

Pennington (1981) propone que un movimiento transpresivo dextral está operando a lo largo del Sistema de Fallas del Frente Oriental Andino, desplazando el Bloque Norandino en dirección N60°E con respecto a la Placa Suramericana a una tasa de 8,6 mm/año, estudios recientes plantean una tasa de 8,1 mm/año corresponden al movimiento de rumbo dextral, paralelo al margen del bloque (Mora-Páez *et al.*, 2019). Varios mecanismos han sido propuestos para explicar el inicio del escape tectónico del Bloque Norandino: colisión del Arco de Panamá (o Bloque Panamá-Chocó) (Farris *et al.*, 2011; Montes *et al.*, 2012), subducción del Ridge de Carnegie (Gutscher, Malavieille, Lallemand y Collot, 1999; Spikings, Winkler, Seward y Handler, 2001; Egbue, Kellogg, Aguirre y Torres, 2014), y cambio a una convergencia más oblicua, y en consecuencia, una mayor partición de la deformación, a lo largo del margen Nazca-Suramérica (Acosta, Lonergan y Coward, 2004; Jiménez, Speranza, Faccenna, Bayona y Mora, 2014).

Velandia *et al.* (2005) presenta una cartografía estructural regional del Sistema de Fallas de Algeciras (SFA) a partir del análisis de imágenes de satélite Landsat TM 5 entre los sectores de Balsillas (Caquetá) y la frontera colombo-ecuatoriana. Estos autores reportan la existencia de estructuras tipo Riedel sintéticas y antitéticas, zonas de desplazamiento principal, cuencas de tracción, y pliegues menores dispuestos de manera oblicua a la traza principal del SFA. Afirman que estos rasgos tectónicos están afectando depósitos

El sismo de Mesetas - Meta del 24 de diciembre de 2019. Aspectos sismológicos, movimiento fuerte y consideraciones geodésicas

cuaternarios y se han relacionado con terremotos históricos mayores (sismos de 1827 con M_s 7,3; 1834 con $M_s > 7$; 1967 con M_w 7) y con sismicidad instrumental. Esto indica la actividad neotectónica del SFA. Adicionalmente, este sistema de fallas es clasificado como una estructura compleja rumbo-deslizante dextral, que involucra tanto la cobertura sedimentaria como las rocas del basamento. Velandia *et al.* (2005) propusieron que el sistema tiene una terminación en cola de caballo al noreste de la cuenca Balsillas; comienza en el golfo de Guayaquil (Ecuador) y continúa hacia Colombia y Venezuela.

El sismo del 24 de diciembre de 2019 se ubicó en el mapa geológico la plancha 304-La Uribe del Servicio Geológico Colombiano, realizada por Gómez *et al.* (2015). En esta plancha muestran con precisión la disposición de las unidades litológicas con respecto al trazo principal de la Falla de Algeciras (figura 4). También identificaron estrías de rumbo sobre el trazo principal de la falla, otra línea de evidencia importante para definir la historia de actividad y la cinemática de la falla. Demuestran que la falla afecta las metamorfitas del Complejo Garzón, separa rocas del Paleozoico, en el bloque noroccidental, de rocas del Cretácico Superior, del Paleógeno, y del Cuaternario, en el bloque suroriental. Adicionalmente identifican depósitos aluviales del Cuaternario relacionados con la actividad de la falla (figura 5).

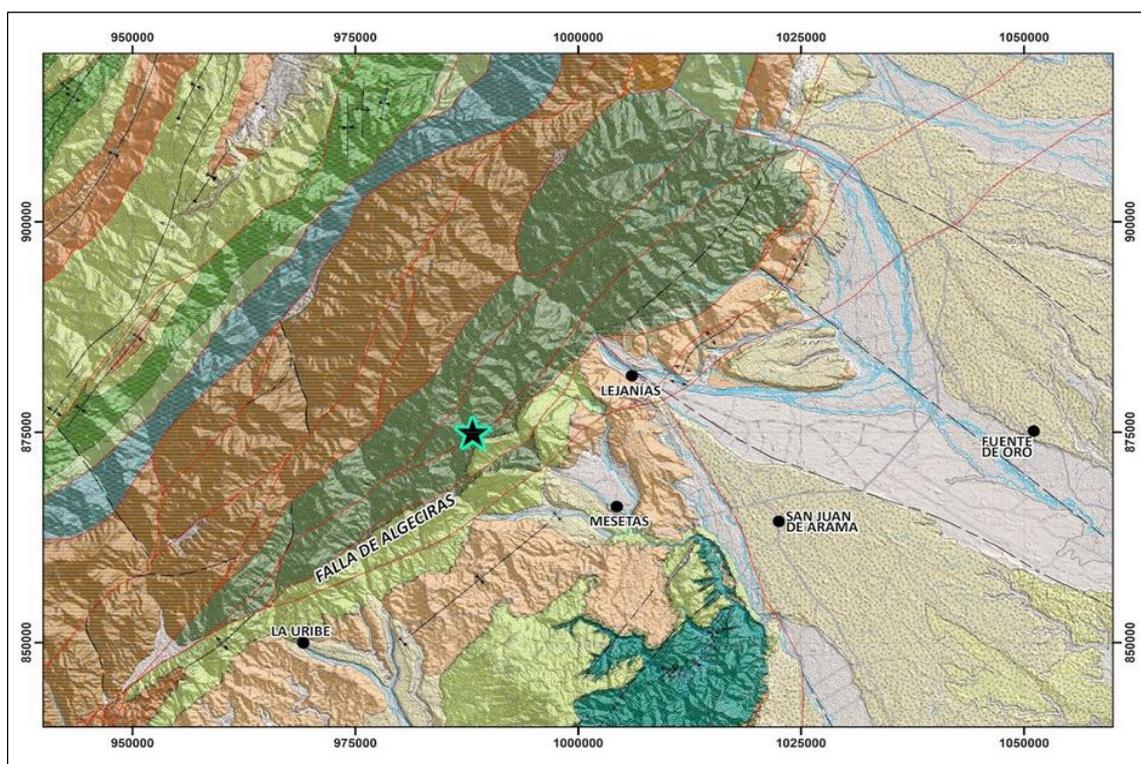


Figura 4. Sistema de Fallas de Algeciras –SFA– entre los sectores de Balsillas - Caquetá y Lejanías – Meta

La estrella representa el epicentro del sismo del 24 de diciembre de 2019 con M_w 6,0

Fuente: plancha 304-La Uribe, Patiño *et al.*, 2015

El sismo de Mesetas - Meta del 24 de diciembre de 2019. Aspectos sismológicos, movimiento fuerte y consideraciones geodésicas

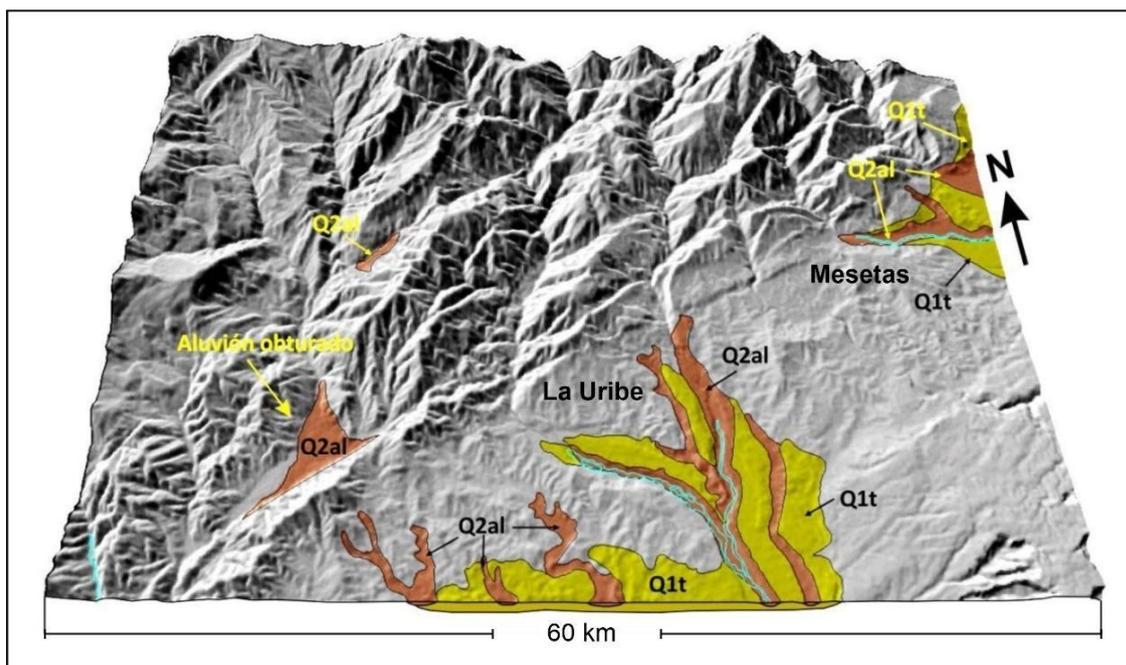


Figura 5. Depósitos aluviales (Q2al) controlados por la actividad de la Falla de Algeciras. La distribución de las unidades litológicas del Cuaternario se representa sobre un DEM de la región de la plancha 304-La Uribe. Fuente: Gómez et al., 2015

Gómez et al. (2015) ilustraron la zona de transferencia entre los sistemas de fallas de Algeciras y Guaicáramo. En esta zona el trazo principal de la Falla de Algeciras tiene una longitud de 70 km y forma una estructura dúplex transpresional por el escalonamiento izquierdo entre los dos sistemas (figura 6), allí ocurrió el sismo.

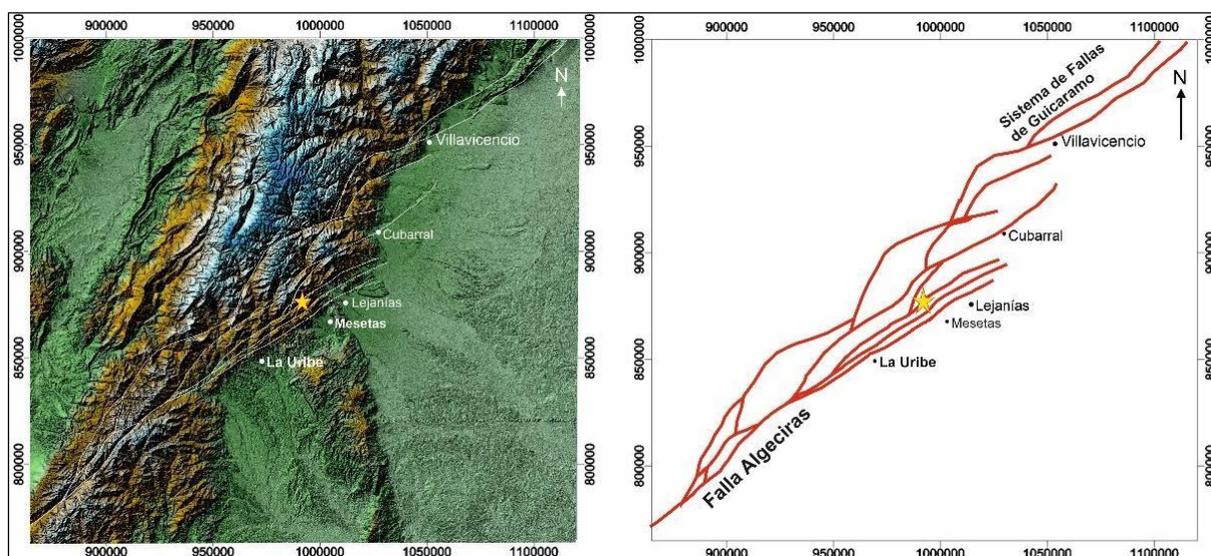
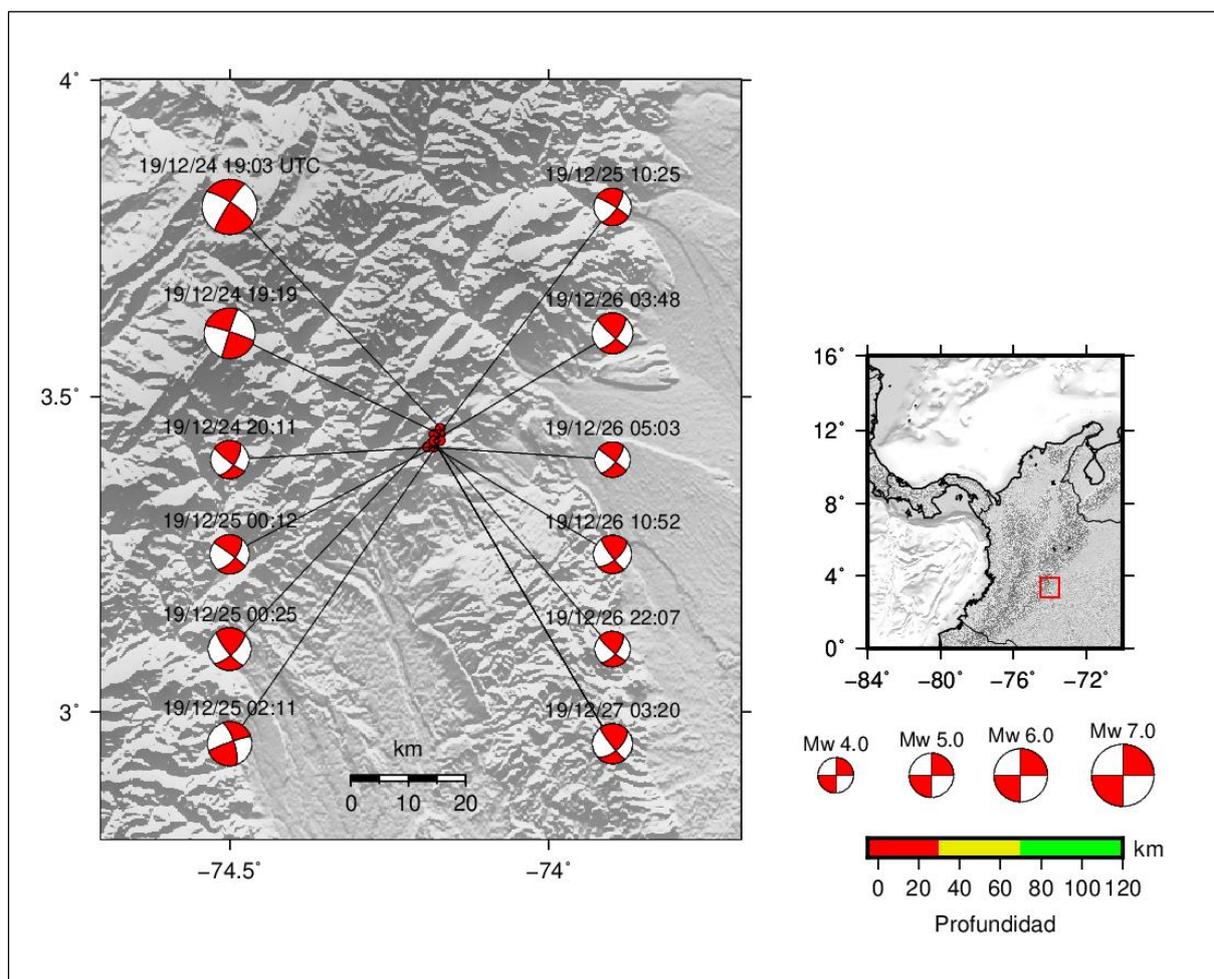


Figura 6. Zona de transferencia entre los sistemas de fallas de Algeciras y Guaicáramo. En el escalón izquierdo entre ambos sistemas se forma una estructura duplex transpresional, donde ocurrió el sismo del 24 de diciembre de 2014. Fuente: Gómez et al., 2015

4. MECANISMOS FOCALES Y TENSORES MOMENTO SÍSMICO

El mecanismo de fuente que caracteriza la sismicidad localizada en Mesetas - Meta es lateral o de rumbo con movimiento dextral, y componente inversa (figuras 7, 8 y 9). Las soluciones del tensor de momento sísmico fueron calculadas para los sismos de mayor magnitud, en el módulo de SeisComp3, SCMTV, cuyo esquema de inversión se basa en la metodología de S. Minson y D. Dreger (2008) (figura 7). Estas soluciones son consistentes con las representaciones de la fuente sísmica dadas mediante SWIFT (Nakano et. al., 2008) - (figura 8), y con las soluciones publicadas en *The Global Centroid-Moment-Tensor* (GlobalCMT) (figura 9).



El sismo de Mesetas - Meta del 24 de diciembre de 2019. Aspectos sismológicos, movimiento fuerte y consideraciones geodésicas

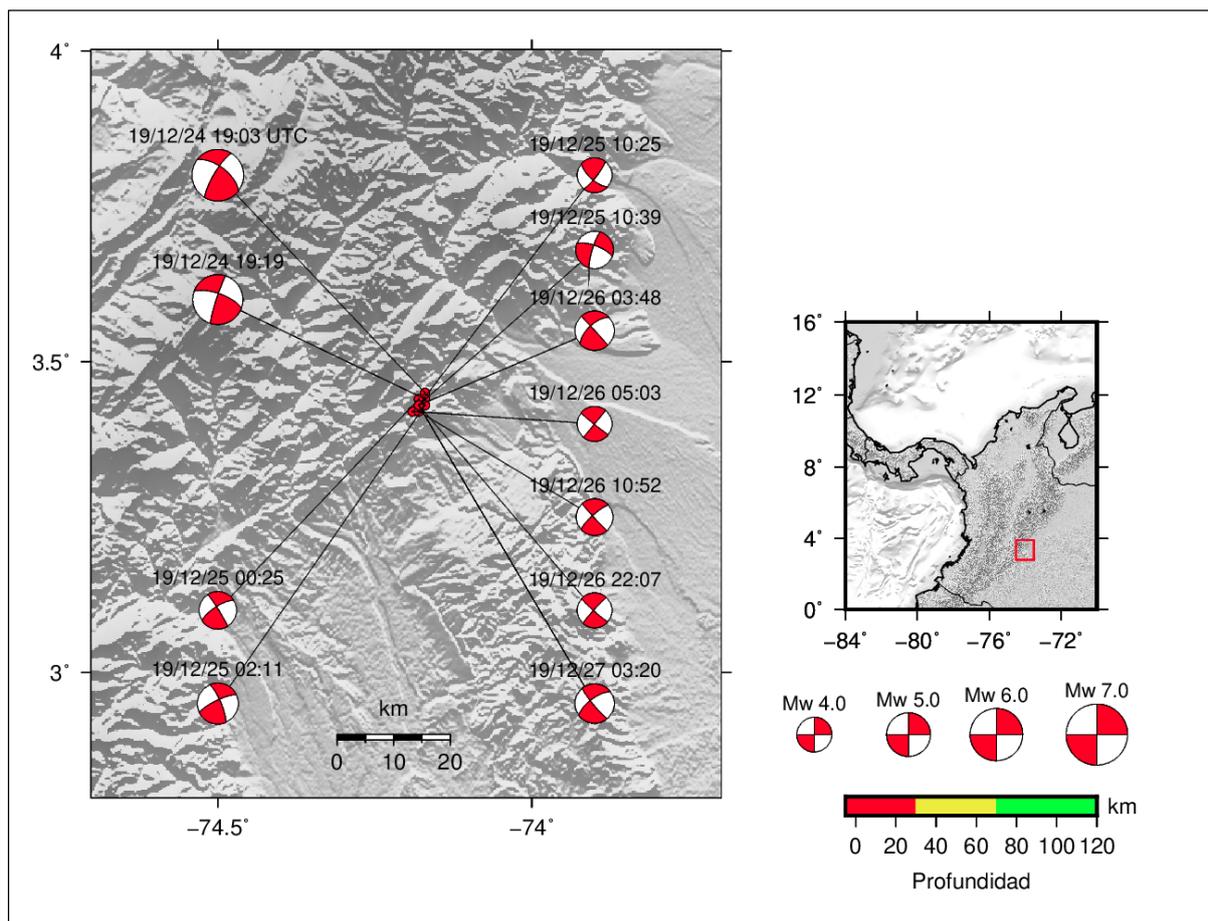


Figura 8. Solución del tensor momento sísmico para los sismos de mayor magnitud entre 2019-12-24 19:00 y 2019-12-30 23:59:59

Soluciones obtenidas utilizando el software SWIFT. El sismo principal de Mw 6,0, es el ubicado en la parte superior izquierda

Fuente: autores

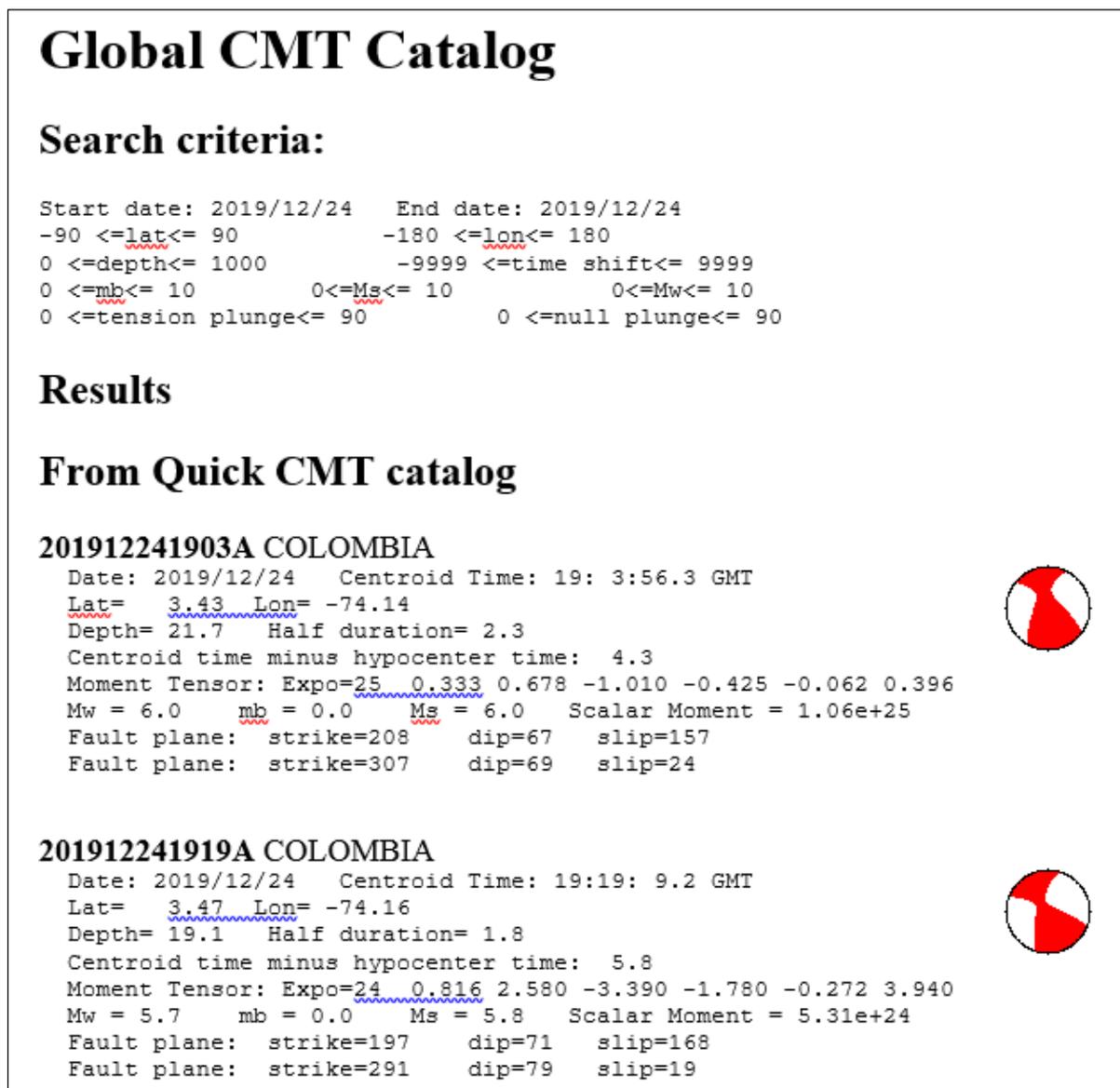
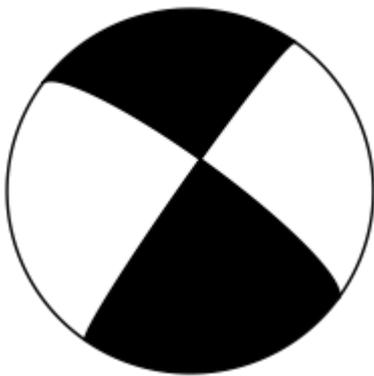


Figura 9. Solución del tensor momento sísmico de los dos sismos en Mesetas - Meta, Mw 6,0 y Mw 5,7 respectivamente, publicados por el GlobalCMT
fuente: <https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>

A continuación, tablas 1, 2 y 3, con los datos obtenidos del tensor momento sísmico de los sismos de mayor magnitud, localizados en Mesetas Meta durante el 24 de diciembre de 2019, calculados en el módulo de SeisComP3, SCMTV, invirtiendo toda la forma de onda del evento (ondas de cuerpo, de superficie y la fase W), la metodología de inversión se basa en la propuesta por S. Minson y D. Dreger (2008).

El sismo de Mesetas - Meta del 24 de diciembre de 2019. Aspectos sismológicos, movimiento fuerte y consideraciones geodésicas

Tabla 1. Parámetros y solución de tensor de momento asociado al sismo 2019-12-24 19:03 UTC
Mw=6,0

Solución Tensor Momento (sismo principal 2019-12-24 19:03 UTC)			
	Latitud centroide	3,46°	
	Longitud centroide	-74,18°	
	Profundidad	13 km	
	M0	9,411536e+17 N.m	
	Magnitud	6,0 Mw	
Planos nodales			
Plano	Strike	Dip	Rake
NP1	306°	74°	5°
NP2	215°	85°	164°
Ejes Principales			
Eje	Plunge	Azimuth	
T	15°	170°	
N	74°	18°	
P	7°	262°	
Tensor de Momento			
Mrr	2.329919e+17 N.m		
Mtt	7.318049e+17 N.m		
Mpp	-9.647968e+17 N.m		
Mrt	-1.205492e+17 N.m		
Mrp	-1.847268e+17 N.m		
Mtp	2.771023e+17 N.m		

Fuente: catálogo Mecanismo Focal y Tensor Momento - Servicio Geológico Colombiano
https://bdrsnc.sgc.gov.co/sismologia1/sismologia/focal_seiscomp_3/index.html

El sismo de Mesetas - Meta del 24 de diciembre de 2019. Aspectos sismológicos, movimiento fuerte y consideraciones geodésicas

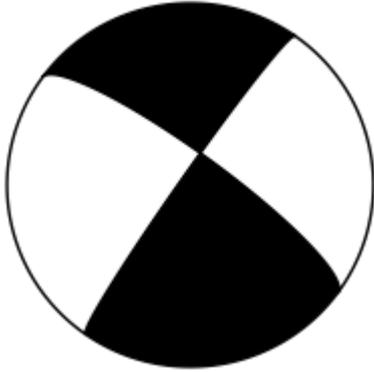
Tabla 2. Parámetros y solución de tensor de momento asociado al sismo 2019-12-24 19:19 UTC
Mw=5,8

Solución Tensor Momento (sismo 2019-12-24 19:19 UTC)			
	Latitud centroide	3,46°	
	Longitud centroide	-74,15°	
	Profundidad	12 km	
	M0	5.322803e+17 N.m	
	Magnitud	5,8 Mw	
Planos nodales			
Plano	Strike	Dip	Rake
NP1	290°	75°	3°
NP2	199°	87°	165°
Ejes Principales			
Eje	Plunge	Azimuth	
T	13°	154°	
N	74°	10°	
P	9°	246°	
Tensor de Momento			
Mrr	4.894345e+16 N.m		
Mtt	3.040116e+17 N.m		
Mpp	-3.529551e+17 N.m		
Mrt	-5.465447e+16 N.m		
Mrp	-1.270566e+17 N.m		
Mtp	3.930572e+17 N.m		

Fuente: catálogo Mecanismo Focal y Tensor Momento - Servicio Geológico Colombiano
https://bdrsnc.sgc.gov.co/sismologia1/sismologia/focal_seiscomp_3/index.html

El sismo de Mesetas - Meta del 24 de diciembre de 2019. Aspectos sismológicos, movimiento fuerte y consideraciones geodésicas

Tabla 3. Parámetros y solución de tensor de momento asociado al sismo 2019-12-24 20:11 UTC
Mw=4,3

Solución Tensor Momento (sismo 2019-12-24 20:11 UTC)			
	Latitud centroide	3,46°	
	Longitud centroide	-74,21°	
	Profundidad	14 km	
	M0	2.531246e+15 N.m	
	Magnitud	4,3 Mw	
Planos nodales			
Plano	Strike	Dip	Rake
NP1	128°	83°	27°
NP2	34°	63°	172°
Ejes Principales			
Eje	Plunge	Azimuth	
T	24°	355°	
N	62°	142°	
P	14°	258°	
Tensor de Momento			
Mrr	4.765658e+14 N.m		
Mtt	1.897455e+15 N.m		
Mpp	-2.374021e+15 N.m		
Mrt	9.050151e+14 N.m		
Mrp	-5.838510e+14 N.m		
Mtp	7.180263e+14 N.m		

Fuente: catálogo Mecanismo Focal y Tensor Momento - Servicio Geológico Colombiano
https://bdrsnc.sgc.gov.co/sismologia1/sismologia/focal_seiscomp_3/index.html

5. MOVIMIENTO FUERTE

El Servicio Geológico Colombiano, a través de su Red Nacional de Acelerógrafos, obtuvo valores de aceleración de las estaciones que registraron el evento sísmico de Mesetas - Meta. Los valores de aceleración fueron calculados a través del módulo de procesamiento *scwfparam*¹ integrado en el sistema de adquisición y procesamiento SeisComp3.

La tabla 4 muestra las aceleraciones registradas en las estaciones ubicadas dentro de un área circular con radio $r = 200$ km, centrada en las coordenadas del epicentro del evento. La aceleración máxima (A_{max}) que se presenta, corresponde a la media geométrica de las componentes horizontales; se calcula la aceleración máxima en porcentaje de gravedad (donde $g = 980 \text{ cm/s}^2$) para facilitar la interpretación de los valores registrados.

Tabla 4. Valores máximos de aceleración de las estaciones que registraron el evento del 24 de diciembre de 2019 a las 14:03 hora local

Datos Evento		Estación de Registro				Aceleraciones en gales				
Fecha	Hora	Estación	Código	REpi	RHipo	Este - Oeste	Norte - Sur	Vertical	Amax	Gravedad
	UTC			(km)	(km)	(cm/s ²)	(cm/s ²)	(cm/s ²)	(cm/s ²)	(%)
24/12/2019	19:03:00	Lejanias, Meta, Colombia	CLEJA	19	26	212,15	155,25	261,24	185,89	18,95
		Uribe, Meta, Colombia	URMC	31	35	169,28	151,78	61,59	160,77	16,39
		Villavicencio, Meta, Colombia	VIL	92	94	33,02	28,8	18,13	30,98	3,16
		Ortega, Tolima, Colombia	ORTC	128	129	15,17	15,56	9,65	15,37	1,57
		Bogotá, SGC	BOG	133	134	7,36	11,22	4,81	9,49	0,97
		La Macarena, Meta, Colombia	MACC	150	151	55,93	56,47	11,44	56,2	5,73
		Embalse de Betania	BET	159	160	4,04	5,25	3,68	4,68	0,48
		Planadas, Tolima, Colombia	PLNC	164	165	23,49	18,57	14,1	21,17	2,16
		San José del Guaviare, Guaviare, Colombia	GUA	201	201	55,2	33,11	22,66	45,52	4,64
		Garzón, Huila, Colombia	GARC	202	202	31,66	21,47	17,36	27,05	2,76

Los registros de las estaciones están ordenados de manera ascendente con la distancia epicentral al evento

Fuente: autores

¹ Este módulo permite calcular: Aceleración Pico, Peak ground acceleration (PGA) /Velocidad Pico, Peak ground velocity (PGV)/Desplazamiento relativo, Espectro de respuesta elástica (DRS)/Aceleración Pseudo absoluta, Espectro de respuesta elástica (PSA).

El sismo de Mesetas - Meta del 24 de diciembre de 2019. Aspectos sismológicos, movimiento fuerte y consideraciones geodésicas

La figura 10 muestra la distribución de las estaciones empleadas para el análisis de movimiento fuerte, incluye el epicentro del evento y las estaciones más cercanas al evento. En los tonos más cálidos hacia el rojo, se identifican las estaciones que registraron las aceleraciones más altas y hacia el verde, las estaciones con valores bajos. Se observa que la aceleración decae rápidamente a los valores mínimos a una distancia de 200km.

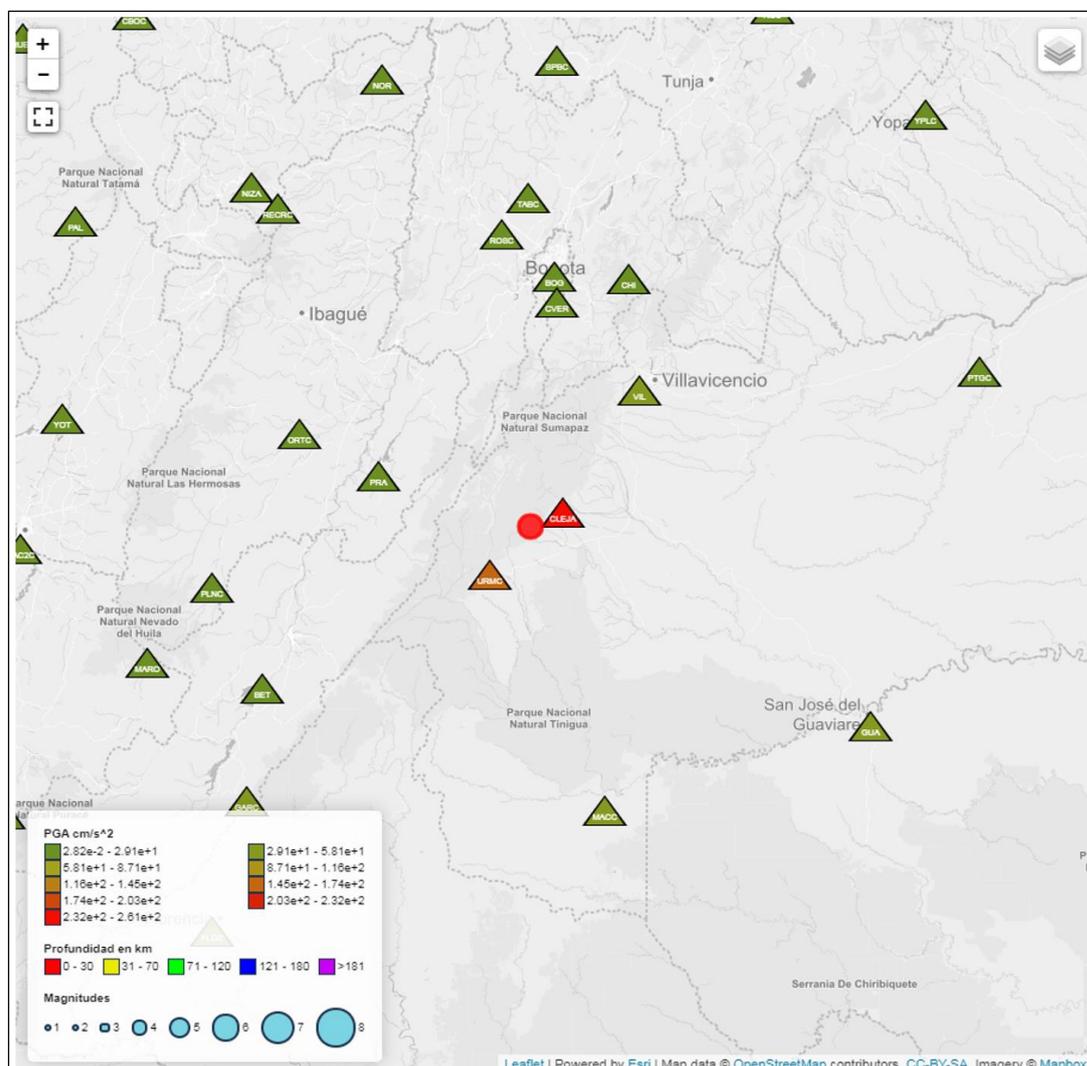


Figura 10. Distribución de estaciones que registraron el evento el 24 de diciembre de 2019, Mw 6,0

Área aproximada de 500 x 500 km centrada en el epicentro. Sin escala definida, polígono en coordenadas geográficas

Fuente: autores

La figura 11 muestra la distribución de las aceleraciones horizontales registradas en cada estación reportada. Se observa que las estaciones de la Macarena, Meta –MACC– y Guaviare, Guaviare –GUA–, tuvieron aceleraciones mayores que Bogotá –BOG– y Ortega, Tolima –ORTC–, a pesar de encontrarse más distantes al epicentro, lo cual se asocia a efectos del sitio donde están instaladas las estaciones.

El sismo de Mesetas - Meta del 24 de diciembre de 2019. Aspectos sismológicos, movimiento fuerte y consideraciones geodésicas

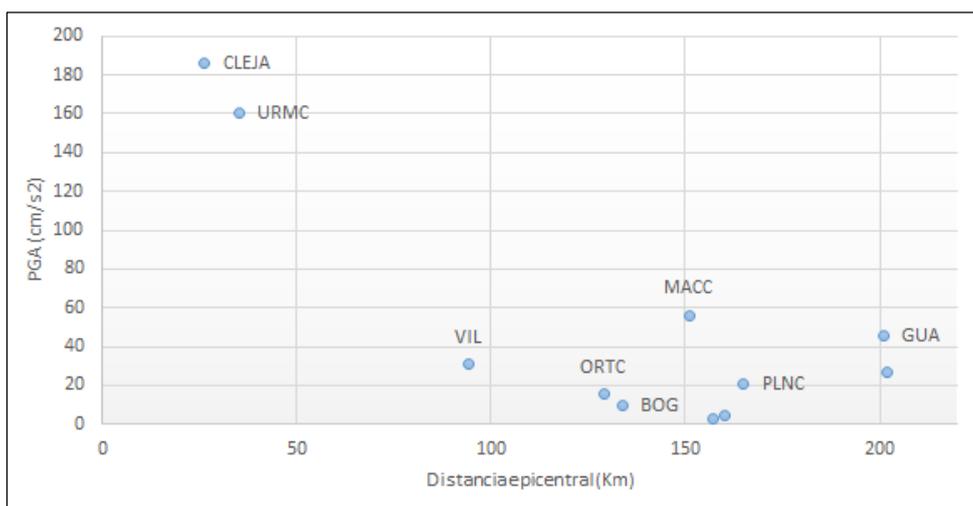


Figura 11. Distribución de aceleraciones horizontales promedio para las estaciones cercanas al epicentro REpi < 200 km

La estación Lejanías, Meta – CLEJA la más cercana al epicentro (~17 km) muestra los mayores valores de aceleración (185,9 cm/s²)

Fuente: autores

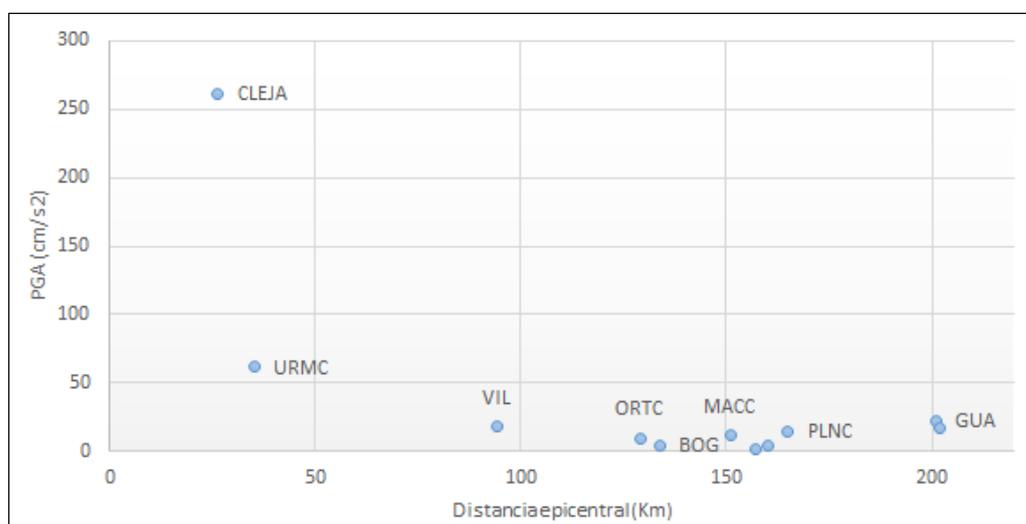


Figura 12. Distribución de aceleración en la componente vertical para las estaciones cercanas al epicentro REpi < 200 km

La estación Lejanías, Meta – CLEJA es la más cercana al epicentro (~17 km) muestra el mayor valor de aceleración (261,24 cm/s²) en la componente vertical

Fuente: autores

La figura 12 muestra las aceleraciones de la componente vertical de las estaciones reportadas en la tabla 4. Se observa que la aceleración de la componente vertical de la estación de Lejanías, Meta - CLEJA, que es la más cercana al epicentro, es mayor que la aceleración en las horizontales ($a_v=261,24 \text{ cm/s}^2$ $a_{M\acute{a}x,H}=185,9 \text{ cm/s}^2$).

La figura 13 muestra el acelerograma y el espectro de respuesta del evento registrado en la estación más cercana Lejanías, Meta – CLEJA. La respuesta espectral muestra un pico predominante alrededor de $T \sim 0,06s$ en la componente vertical, dos en la componente en la Este-Oeste en $T \sim 0.1s$ y $0.25s$ y dos en la Norte-Sur en $T \sim 0.1s$ y $0.6s$.

El sismo de Mesetas - Meta del 24 de diciembre de 2019. Aspectos sismológicos, movimiento fuerte y consideraciones geodésicas

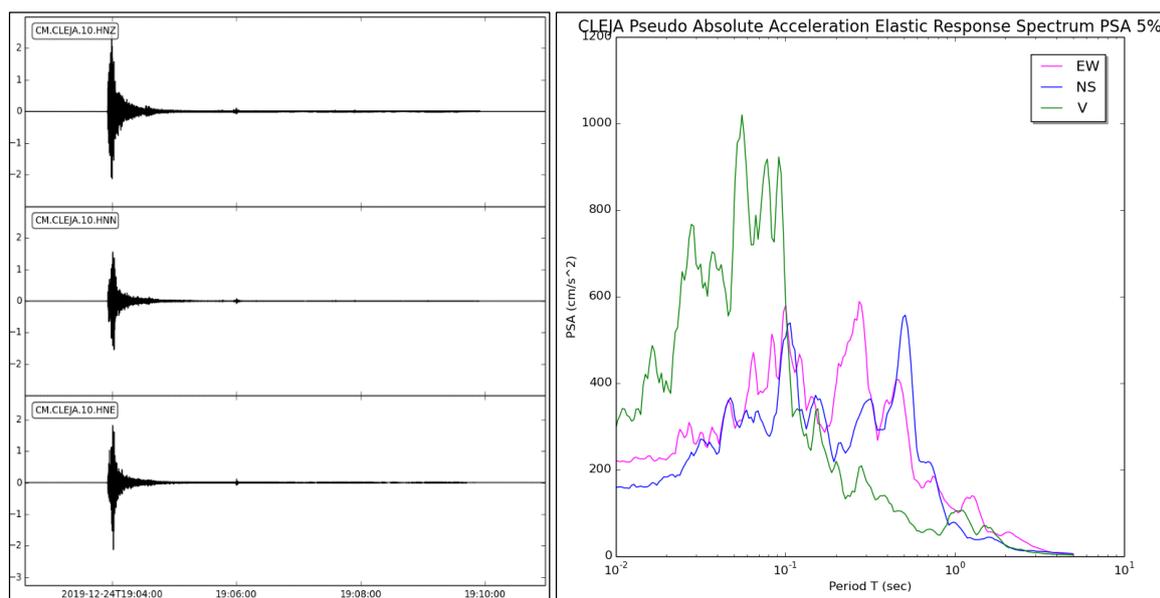


Figura 13. Acelerograma del evento (Mw 6,0) y espectro de respuesta

Espectro de respuesta para un amortiguamiento del 5%, para las tres componentes de la estación Lejanías, Meta – CLEJA

Fuente: autores

Red de acelerógrafos de Bogotá (RAB)

Complementando las aceleraciones reportadas por la Red Nacional y teniendo en cuenta la proximidad a Bogotá de los sismos localizados en Mesetas - Meta, en la tabla 5 se muestran las aceleraciones máximas registradas por las estaciones acelerográficas de la Red de Bogotá (RAB). Esta información fue suministrada por el Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático –IDIGER–, entidad operadora de la Red de Acelerógrafos de Bogotá, la cual registró las máximas aceleraciones de 20 cm/s^2 en las estaciones de Bomberos Marichuela –CMARI–, a una distancia epicentral de 120 km, y de 19,8 cm/s^2 en la estación Usaquéen –CUSAQ– a una distancia epicentral 143 km.

Tabla 5. Aceleraciones máximas registradas por la RAB del Sismo ocurrido el 24 de diciembre a las 14:03 hora local

Datos Evento		Estación de Registro			Aceleraciones en gales				
Fecha	Hora	Estación	Código	REpi	Este - Oeste	Norte - Sur	Vertical	Amax	Grave dad
	UTC			(km)	(cm/s^2)	(cm/s^2)	(cm/s^2)	(cm/s^2)	(%)
24/12/2019	19:03:00	BOMBEROS MARICHUELA	CMARI	120	20	19,1	8,4	20	2,04
		CENTRO EDUCATIVO DISTRITAL SIERRA MORENA	CSMOR	127	4,3	5,7	2,7	5,7	0,58
		ESCUELA DE CADETES DE POLICÍA GENERAL SANTANDER	CGRAL	129	7,6	6,4	5,6	7,6	0,77

El sismo de Mesetas - Meta del 24 de diciembre de 2019. Aspectos sismológicos, movimiento fuerte y consideraciones geodésicas

Datos Evento		Estación de Registro			Aceleraciones en gales				
Fecha	Hora	Estación	Código	REpi	Este - Oeste	Norte - Sur	Vertical	Amax	Gravedad
	UTC			(km)	(cm/s ²)	(cm/s ²)	(cm/s ²)	(cm/s ²)	(%)
24/12/2019	19:03:00	COLEGIO SAN BARTOLOMÉ	CBART	133	4,8	3,4	2,2	4,8	0,49
		BOMBEROS PUENTE ARANDA	CARAN	135	9,4	9,1	3,3	9,4	0,96
		COLEGIO KENNEDY	CCKEN	135	5	6,2	3,1	6,2	0,63
		PLANTA DE BOMBEO FONTIBÓN	CFONT	137	6,6	9	3,6	9	0,92
		JARDÍN BOTÁNICO	CJABO	138	7,9	8,5	3,7	8,5	0,87
		CLUB EL TIEMPO	CTIEM	140	7,3	8,6	2,4	8,6	0,88
		CENTRO DE ESTUDIOS DEL NIÑO	CNIÑO	141	7,9	8,2	3,3	8,2	0,84
		CENTRO EDUCATIVO DISTRITAL DE USAQUÉN	CUSAQ	143	19,8	13,4	11,2	19,8	2,02
		TV CABLE	CTVCA	144	4,4	4,2	3,1	4,4	0,45
		UNIVERSIDAD DE LA SALLE	CUSAL	148	4,7	7,3	5	7,3	0,74
		ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA	CEING	151	9,4	9,1	3,3	9,4	0,96

Los registros de las estaciones están ordenados de manera ascendente con la distancia epicentral al evento
Fuente: autores

Réplicas $M \geq 4,5$

En la tabla 6 se presentan las aceleraciones registradas por la Red Nacional de Acelerógrafos del Servicio Geológico Colombiano, en las réplicas con magnitud $M \geq 4,5$, para las estaciones con registros más altos en un radio de 200 km centrado en los epicentros. Se presentan las aceleraciones horizontales y verticales de las estaciones en gales (cm/s^2) y se calcula la aceleración máxima en porcentaje de gravedad (donde $g = 980 \text{ cm/s}^2$) para facilitar la interpretación de los valores registrados

El sismo de Mesetas - Meta del 24 de diciembre de 2019. Aspectos sismológicos, movimiento fuerte y consideraciones geodésicas

Tabla 6. Valores de aceleración de las estaciones con registros más altos en las réplicas de magnitud $M \geq 4,5$ en un radio de $R \sim 200$ km centrado en los epicentros

EVENTO			DATOS ESTACIÓN				ACELERACIONES					
Fecha	Hora	Mag	Nombre Estación	Código Estación	REpi (km)	RHipo (km)	EW (cm/s ²)	NS (cm/s ²)	Vertical (cm/s ²)	AMax_H (cm/s ²)	Amax H (%g)	Amax V (%g)
24/12/2019	19:19:05	5,8	Lejanias, Meta, Colombia	CLEJA	21	25	103,18	110,53	140,87	106,85	10,90	14,37
			Uribe, Meta, Colombia	URMC	29	32	103,76	124,24	68,87	114,00	11,63	07,03
			Prado, Tolima, Colombia	PRA	82	83	6,90	8,45	4,57	7,68	0,78	0,47
			Villavicencio, Meta, Colombia	VIL	94	95	17,65	18,72	10,75	18,19	1,86	1,10
			Ortega, Tolima, Colombia	ORTC	128	128	7,42	8,38	3,74	7,90	0,81	0,38
			Bogotá, SGC	BOG	135	136	6,48	6,89	2,96	6,69	0,68	0,30
			La Macarena, Meta, Colombia	MACC	149	149	27,82	37,03	8,63	32,43	3,31	0,88
			Planadas, Tolima, Colombia	PLNC	163	163	20,02	19,81	11,87	19,92	2,03	1,21
			Garzón, Huila, Colombia	GARC	200	200	22,07	11,48	12,29	16,77	1,71	1,25
			San José del Guaviare, Colombia	GUA	201	202	42,36	30,89	15,50	36,63	3,74	1,58
25/12/2019	2:11:22	4,7	Lejanias, Meta, Colombia	CLEJA	18	21	76,63	64,29	87,27	70,46	7,19	8,91
			Uribe, Meta, Colombia	URMC	31	33	18,86	25,03	11,26	21,94	2,24	1,15
			Prado, Tolima, Colombia	PRA	87	87	1,75	1,87	1,46	1,81	0,18	0,15
			Villavicencio, Meta, Colombia	VIL	92	93	6,41	8,51	4,76	7,46	0,76	0,49
			Ortega, Tolima, Colombia	ORTC	132	132	1,82	1,90	01,08	1,86	0,19	0,11

El sismo de Mesetas - Meta del 24 de diciembre de 2019. Aspectos sismológicos, movimiento fuerte y consideraciones geodésicas

EVENTO			DATOS ESTACIÓN				ACELERACIONES					
Fecha	Hora	Mag	Nombre Estación	Código Estación	REpi (km)	RHipo (km)	EW (cm/s ²)	NS (cm/s ²)	Vertical (cm/s ²)	AMax_H (cm/s ²)	Amax H (%g)	Amax V (%g)
25/12/2019	2:11:22	4,7	Bogotá, SGC Superficie	BOG	136	136	1,79	1,85	0,65	1,82	0,19	0,07
			La Macarena, Meta, Colombia	MACC	147	147	8,12	8,50	1,83	8,31	0,85	0,19
			Planadas, Tolima, Colombia	PLNC	167	167	3,54	03,09	1,68	3,32	0,34	0,17
			Garzón, Huila, Colombia	GARC	202	203	4,51	2,89	1,82	3,70	0,38	0,19
26/12/2019	3:48:29	4,6	Lejanias, Meta, Colombia	CLEJA	19	27	37,01	38,18	37,78	37,59	3,84	3,86
			Uribe, Meta, Colombia	URMC	31	36	15,34	12,52	9,73	13,93	1,42	0,99
			Prado, Tolima, Colombia	PRA	86	88	0,96	1,18	0,79	01,07	0,11	0,08
			Villavicencio, Meta, Colombia	VIL	93	95	5,37	6,97	3,91	6,17	0,63	0,40
			Ortega, Tolima, Colombia	ORTC	131	133	2,72	3,35	0,95	03,03	0,31	0,10
			Bogotá, SGC Superficie	BOG	136	137	1,12	01,04	0,46	01,08	0,11	0,05
			La Macarena, Meta, Colombia	MACC	147	148	05,05	5,35	1,39	5,20	0,53	0,14
			Planadas, Tolima, Colombia	PLNC	166	167	2,73	2,69	1,85	2,71	0,28	0,19
			Garzón, Huila, Colombia	GARC	202	203	3,10	2,73	2,87	2,91	0,30	0,29

Se presentan los valores de aceleración de cada componente en gales (cm/s²) y los valores máximos de la media geométrica de las componentes horizontales y la vertical en %g para facilitar su interpretación. Los registros de las estaciones están ordenados de manera ascendente con la distancia epicentral a cada evento

Fuente: autores

Se consignan los valores de aceleración de 9 estaciones seleccionadas a partir del valor de su registro en cada réplica. Se observa que la estación de Lejanías, Meta - CLEJA tiene un comportamiento similar al presentado en el evento principal, donde la aceleración en la componente vertical es mayor que la aceleración máxima registrada en la horizontal, como se observa en las columnas Amax_H y Amax_V , para cada réplica.

Las estaciones La Macarena, Meta - MACC, Planadas, Tolima - PLNC y Garzón, Huila - GARC registran valores superiores a las estaciones que están más cerca del epicentro. Estos valores más altos aunque más lejanos, se pueden asociar a efectos del sitio donde están ubicadas las estaciones. La estación San José del Guaviare, Guaviare - GUA, ubicada a una distancia $R_{Epi} \sim 200$ km de la réplica de Mw 5,8 tuvo un registro de aceleración horizontal mayor a las estaciones más cercanas e incluso mayor que la estación de La Macarena, Meta - MACC, la cual en el evento principal tuvo un valor comparable con el de GUA.

La figura 14 muestra la distribución de las aceleraciones de las estaciones reportadas en la tabla 6. Se observa en marcadores circulares los valores de las componentes verticales de las estaciones a modo de comparación con los valores de las componentes horizontales, cuyos marcadores con cuadrados. Los marcadores color azul corresponden a los registros de la réplica principal de magnitud Mw 5,8, los de color rojo la réplica de magnitud Mw 4,7 y en amarillo la de magnitud Mw 4,6. Agrupados verticalmente se observa los registros de cada estación con respecto a su distancia epicentral R_{Epi} .

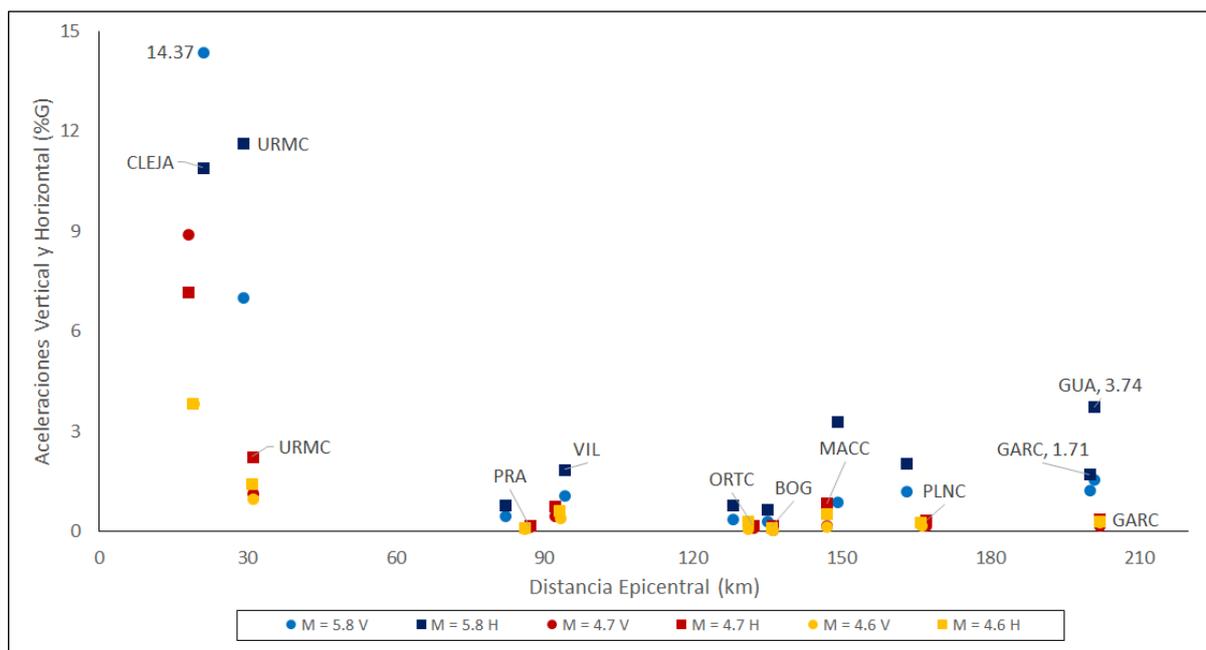


Figura 14. Distribución de aceleraciones de las réplicas $M \geq 4,5$ en las estaciones contenidas en un área circular de $r \sim 200$ km

Estaciones que presentaron los mayores valores de aceleración. La aceleración se presenta en %g, donde $g = 980 \text{ cm/s}^2$

Fuente: autores

Se puede apreciar la diferencia del registro de la estación de CLEJA en la componente vertical (14,37 %g) con respecto a su máxima horizontal (10,90 %g), así mismo se puede ver cómo se invierte esa relación para las demás estaciones donde el mayor registro se presenta en la componente horizontal y no en la vertical. Este mayor registro en la vertical de la estación de CLEJA puede asociarse a la cercanía de esta a la fuente.

La estación de Guaviare - GUA se incluye para la réplica principal para observar que su registro fue mayor que las estaciones más cercanas, incluso mayor que la estación de Garzón, Huila - GAR que se encuentra a la misma distancia del epicentro (marcadores azules en el último grupo de puntos).

6. SISMICIDAD HISTÓRICA EN LA REGIÓN

Tres grandes sismos históricos se han relacionado al Sistema de Fallas de Algeciras, región en la que ocurrió el sismo del 24 de diciembre, estos son: 12 de julio de 1785, 31 de agosto de 1917 y 9 de febrero de 1967. La localización de estos se presenta en la figura 15 y el detalle de los parámetros sismológicos en la tabla 7.

Estos sismos causaron destrucción y daños considerables especialmente en poblaciones de los departamentos de Cundinamarca, Meta, Tolima y Huila, así como pérdidas económicas y humanas.

El sismo de Mesetas - Meta del 24 de diciembre de 2019. Aspectos sismológicos, movimiento fuerte y consideraciones geodésicas

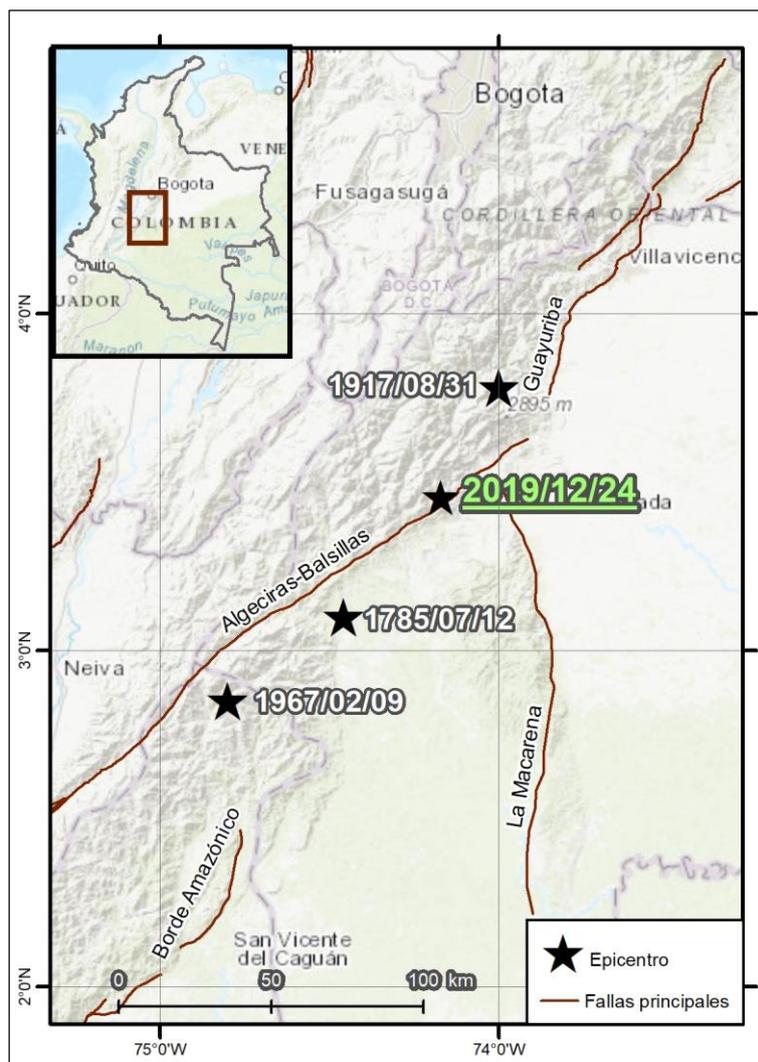


Figura 15. Localización de sismos históricos asociados a la Falla de Algeciras
Falla generadora del evento del 24 de diciembre de 2019
Fuente: autores

Tabla 7. Sismos históricos en la región

Fecha	Hora local	Epicentro		Mag. (Mw)	Prof. (km)	Intensidad máxima (EMS-98)	Sitio relacionado
		Lat.	Long.				
1785-07-12	07:45	2,97	-74,31	7,1	< 50	7	Límite Huila-Meta
1917-08-31	06:36	3,78	-74,0	6,7	< 50	9	Piedemonte llanero
1967-02-09	10:24	2,93	-74,83	7,0	< 50	10	Colombia (Huila)

Fuente: sistema de información de sismicidad histórica <http://sish.sgc.gov.co/visor/>

Una breve descripción del significado de los 12 grados de intensidad que incluye la escala de intensidad Macrosísmica Europea de 1998 (EMS-98), se presenta en la tabla 8.

Tabla 8. Descripción de valores de intensidad, según la escala EMS-98

Intensidad	Descripción
1. No sentido	No se siente.
2. Sentido levemente	Sentido por muy pocas personas que se encuentran en reposo dentro de viviendas.
3. Débil	Sentido en el interior de viviendas por pocas personas. La gente en reposo siente una oscilación o temblor leve. Objetos colgantes se mecen levemente
4. Observado ampliamente	Sentido por muchas personas en el interior de edificaciones y por pocos en el exterior. Pocas personas se despiertan. Las ventanas, puertas y platos vibran.
5. Fuerte	Sentido por casi todos en el interior de edificaciones y por pocos en el exterior. Algunos se asustan y salen a la calle. Muchas personas dormidas se despiertan. Las puertas y ventanas se abren y cierran y los líquidos se derraman. Se pueden presentar fisuras en muros de edificaciones muy vulnerables.
6. Daño leve	Mucha gente se asusta y corre a la calle. Algunos pierden el equilibrio. Algunos objetos caen. Muchas viviendas sufren daños leves no estructurales, como grietas en muros y caída de partes del revestimiento.
7. Daño moderado	La mayoría de la gente se asusta y corre a la calle. Los muebles son desplazados y caen objetos de repisas. Muchos edificios bien construidos presentan grietas largas en muros, caída de revestimiento en gran proporción y caída de partes de chimeneas. Los edificios más vulnerables pueden mostrar grandes grietas en los muros y fallas en las paredes y muros divisorios.
8. Daño severo	A mucha gente le cuesta mantenerse de pie. Desplazamiento o volcamiento de muebles pesados. Unos pocos edificios bien construidos muestran daños serios en los muros, mientras que las estructuras antiguas y débiles pueden colapsar.
9. Destructivo	Hay pánico general. Muchas construcciones débiles colapsan e incluso los edificios bien construidos muestran daños serios: fallas graves en los muros y fallas estructurales parciales.
10. Muy destructivo	Muchos edificios ordinarios bien construidos colapsan.
11. Devastador	La mayoría de los edificios ordinarios bien construidos colapsan, incluso algunos con buen diseño sismorresistente son destruidos.
12. Totalmente devastador	Casi todos los edificios son destruidos.

Fuente: Grünthal, 2009

El resumen de los eventos históricos mencionados anteriormente, se presenta a continuación:

- **Sismo del 12 de julio de 1785:** se sintió de forma fuerte y causó daños en varias poblaciones del centro del país. En Bogotá colapsó la Ermita de Guadalupe y la Iglesia de Engativá y se presentaron daños severos en otras iglesias como la de Santo Domingo, San Francisco, Las Cruces, Santa Inés, San Carlos, Las Nieves, Veracruz y San Diego. Nueve personas perdieron la vida y hubo cinco heridos a causa de los daños.

Las iglesias de Fosca, Fómeque, Facatativá, Cajicá, Cota, Chía, Pasca, Bojacá, Soacha y Cáqueza se vieron notablemente averiadas, siendo necesario reedificar algunas de ellas. En Neiva hubo daños en la casa de cabildo, la del gobernador, la cárcel, el hospital y la iglesia parroquial.

En Tunja hubo daños en el Convento de la Concepción y grietas en un tabique del convento de San Francisco. La intensidad máxima fue 7, y se estimó en Bogotá, Soacha y Neiva.

- **Sismo del 31 de agosto de 1917:** se sintió fuertemente en el centro del país y causó daños en algunas poblaciones de los departamentos de Meta y Cundinamarca. En Villavicencio, la mayoría de las construcciones quedaron averiadas y algunas colapsaron, siendo tal la ruina de la ciudad, que las autoridades pensaron reconstruirla en un nuevo lugar. En San Martín (Meta) la mayoría de las casas quedaron inhabitables y algunas colapsaron; en Cáqueza se derrumbaron algunas viviendas y en Bogotá, se registraron más de 300 edificaciones averiadas y 40 destruidas.

Hacia el flanco oriental de la Cordillera oriental, en la vereda Nazareth (jurisdicción de Bogotá - Sumapaz), se produjo un deslizamiento de grandes dimensiones, que sepultó personas, viviendas y animales. También se presentaron deslizamientos sobre los ríos Ariari, Guamal y Orotoy y se abrieron grietas en el terreno cerca de Villavicencio y Servitá.

En total 22 personas perdieron la vida en Bogotá, Villavicencio y el deslizamiento en Nazareth.

Se reportaron réplicas hasta el 27 de septiembre de ese año, entre las cuales se destaca la del 6 de septiembre, que se sintió fuerte en muchas poblaciones del centro y sur del país. La intensidad máxima fue 9 y se evaluó en San Martín, Villavicencio y Cáqueza.

- **Sismo del 9 de febrero de 1967:** fue sentido en gran parte del país, desde Barranquilla hasta Pasto, e incluso hubo reportes de haberse sentido levemente en Quito (Ecuador).

Los daños más significativos ocurrieron en el departamento del Huila, principalmente en los municipios de Colombia y Campoalegre, donde muchas viviendas y edificios públicos colapsaron, y el resto de construcciones presentaron averías. En Neiva, Altamira y Suaza se reportó la destrucción de viviendas elaboradas en mampostería no confinada, así como agrietamiento de muros y techos de varias edificaciones. Solamente en ese departamento cerca de 8.000 inmuebles, incluyendo casas, edificios públicos, colegios, cuarteles de policía e iglesias resultaron destruidos o averiados y 75 personas fallecieron.

En varias poblaciones de los departamentos de Tolima y Caquetá también se registraron daños importantes como la destrucción de viviendas de adobe, tapia pisada, bahareque o ladrillo, así como separación de muros y caída de techos. La severidad de los daños fue disminuyendo hacia las poblaciones de los departamentos de Cundinamarca, Meta, Quindío, Risaralda, Cauca y Valle del Cauca. Según cifras oficiales hubo casi un centenar de muertos y más de 300 heridos a causa del evento.

Se reportaron efectos en el terreno como agrietamientos, fenómenos de remoción en masa y licuación de suelos, los cuales afectaron la movilidad en las vías. Durante el primer mes posterior al sismo, el Instituto Geofísico de los Andes Colombianos que para esa época hacía el monitoreo sísmico en el país, registró 350 réplicas la mayoría de ellas no perceptibles para la gente. La intensidad máxima fue 10 y se evaluó en Campoalegre y Colombia (Huila).

7. EVALUACIÓN DE INTENSIDADES A PARTIR DE LOS REPORTES RECIBIDOS VÍA INTERNET

La intensidad sísmica es una medida cualitativa que se evalúa teniendo en cuenta los efectos observados en las personas, objetos, construcciones y naturaleza, en un área determinada. Estos efectos fueron reportados por la población, por medio del aplicativo web disponible en la página del Servicio Geológico Colombiano: <http://sismosentido.sgc.gov.co/>, los cuales fueron evaluados automáticamente, con el fin de asignarles un grado de intensidad según la Escala Macrosísmica Europea de 1998 (EMS-98).

El sismo del 24 de diciembre de magnitud 6,0 y sus consecuentes réplicas, fueron sentidas en un área extensa del país. Hasta la réplica ocurrida el 23 de enero de 2020 a la 1:29 p.m. (mag. 2,3), se recibieron más de 16.000 reportes a través del aplicativo mencionado. La información aportada por los usuarios permitió evaluar automáticamente la intensidad del sismo principal y 48 réplicas.

El sismo de Mesetas - Meta del 24 de diciembre de 2019. Aspectos sismológicos, movimiento fuerte y consideraciones geodésicas

La mayoría de los reportes fueron recibidos de ciudades como Bogotá, Cali, Villavicencio, Ibagué, Pereira, Medellín, Neiva, Manizales y Popayán y la intensidad máxima evaluada fue 6, en municipios cercanos al epicentro como Fuente de Oro, Puerto Concordia, El Dorado, Lejanías, Villavicencio y Mesetas (Meta), donde se sintió muy fuerte, hubo vibración y caída de objetos y se reportaron daños leves en algunas construcciones.

En la figura 16 se presenta el mapa de intensidades del sismo principal, para el cual se han recibido 6.961 reportes de 469 centros poblados. Las réplicas para las cuales se recibieron más reportes, fueron las ocurridas el 24 de diciembre las 2:19 p.m. (3.301 reportes) y el 25 de diciembre a las 10:48 p.m. (3.311 reportes).

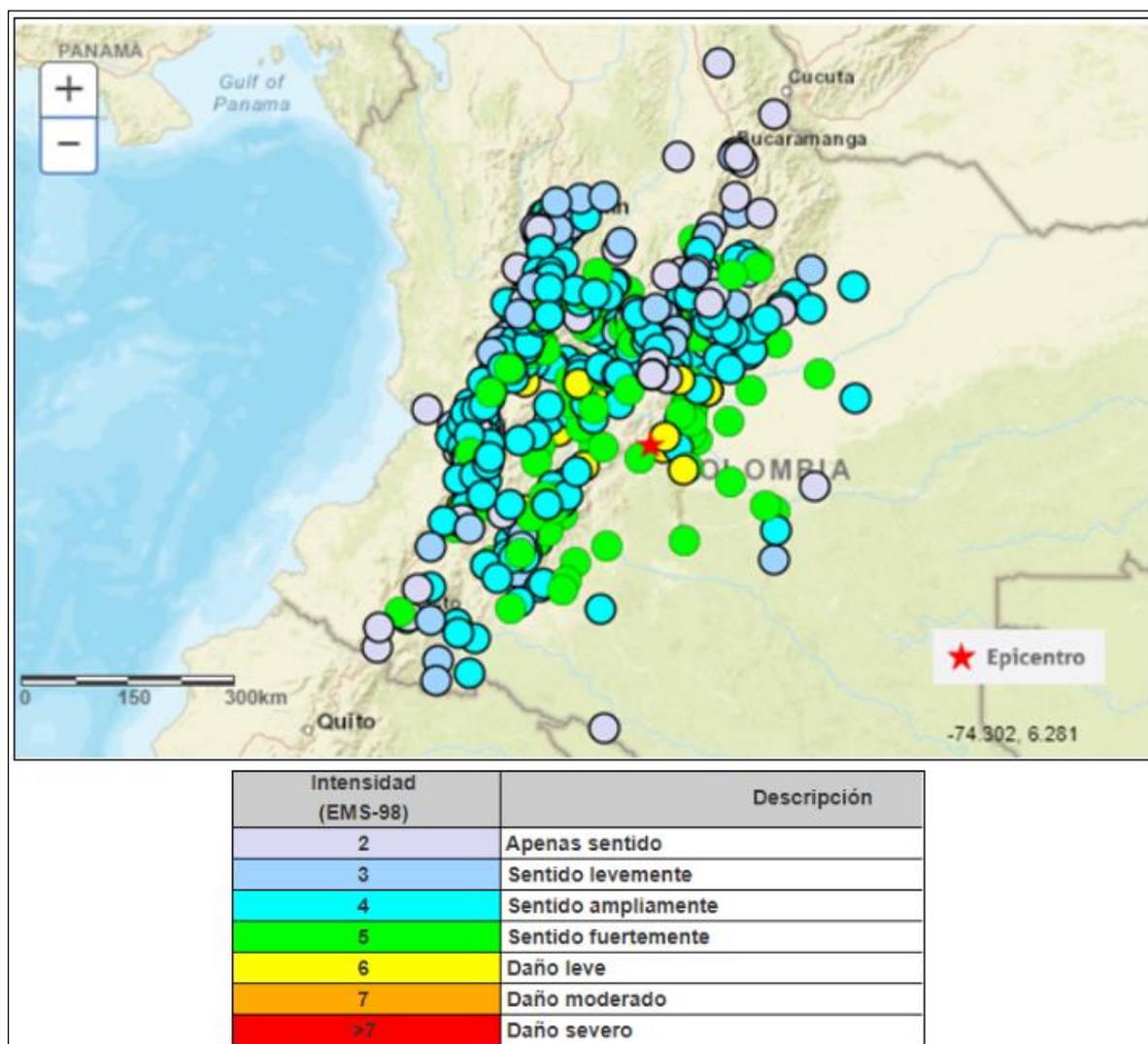


Figura 16. Mapa de intensidades reportadas del sismo de Mw = 6,0 el 24 de diciembre de 2019
 Hora local: 2:03:51 p.m. Reportes de sismo sentido
 Fuente: <https://bit.ly/2Q5dnjM>

El sismo de Mesetas - Meta del 24 de diciembre de 2019. Aspectos sismológicos, movimiento fuerte y consideraciones geodésicas

El listado de las réplicas que la población reportó como sentidas, se presenta en la tabla 9. En la primera fila se incluye el sismo principal.

Tabla 9. Listado de réplicas reportadas como sentidas

Fecha y hora local	Lat (°).	Long (°).	Mag.	Intensidad máxima	# reportes	Epicentro
24/12/2019 - 02:03 PM	3,462	-74,184	6,0	6	6.961	Mesetas - Meta, Colombia
24/12/2019 - 02:19 PM	3,465	-74,154	5,8	6	3.301	Mesetas - Meta, Colombia
24/12/2019 - 03:11 PM	3,462	-74,214	4,3	5	41	Mesetas - Meta, Colombia
24/12/2019 - 03:23 PM	3,424	-74,185	4,1	6	124	Mesetas - Meta, Colombia
24/12/2019 - 07:12 PM	3,419	-74,146	3,9	5	41	Mesetas - Meta, Colombia
24/12/2019 - 07:25 PM	3,437	-74,165	4,4	5	93	Mesetas - Meta, Colombia
24/12/2019 - 09:11 PM	3,426	-74,161	4,7	6	507	Mesetas - Meta, Colombia
24/12/2019 - 10:12 PM	3,425	-74,175	3,8	5	37	Mesetas - Meta, Colombia
24/12/2019 - 11:28 PM	3,477	-74,189	2,2	4	5	Mesetas - Meta, Colombia
25/12/2019 - 03:52 AM	3,437	-74,173	3,8	5	8	Mesetas - Meta, Colombia
25/12/2019 - 05:25 AM	3,436	-74,187	4,1	5	70	Mesetas - Meta, Colombia
25/12/2019 - 05:31 AM	3,430	-74,190	3,8	5	39	Mesetas - Meta, Colombia
25/12/2019 - 05:39 AM	3,473	-74,189	3,9	5	14	Mesetas - Meta, Colombia
25/12/2019 - 09:19 AM	3,413	-74,178	2,2	4	3	Mesetas - Meta, Colombia
25/12/2019 - 05:02 PM	3,440	-74,190	2,6	6	4	Mesetas - Meta, Colombia
25/12/2019 - 06:26 PM	3,486	-74,167	3,2	5	46	Mesetas - Meta, Colombia
25/12/2019 - 10:48 PM	3,425	-74,168	4,6	6	3.311	Mesetas - Meta, Colombia
26/12/2019 - 12:03 AM	3,429	-74,196	4,0	5	193	Mesetas - Meta, Colombia
26/12/2019 - 01:06 AM	3,472	-74,207	2,4	4	4	Mesetas - Meta, Colombia
26/12/2019 - 05:52 AM	3,408	-74,172	4,3	5	143	Mesetas - Meta, Colombia
26/12/2019 - 08:48 AM	3,436	-74,230	2,9	4	2	Mesetas - Meta, Colombia
26/12/2019 - 09:57 AM	3,427	-74,149	3,5	5	18	Mesetas - Meta, Colombia
26/12/2019 - 05:07 PM	3,416	-74,171	4,0	6	176	Mesetas - Meta, Colombia
26/12/2019 - 07:00 PM	3,461	-74,201	2,9	4	4	Mesetas - Meta, Colombia
26/12/2019 - 08:03 PM	3,422	-74,173	3,8	5	32	Mesetas - Meta, Colombia

El sismo de Mesetas - Meta del 24 de diciembre de 2019. Aspectos sismológicos, movimiento fuerte y consideraciones geodésicas

Fecha y hora local	Lat (°).	Long (°).	Mag.	Intensidad máxima	# reportes	Epicentro
26/12/2019 - 10:20 PM	3,413	-74,166	4,4	6	969	Mesetas - Meta, Colombia
27/12/2019 - 10:13 AM	3,437	-74,178	2,7	3	3	Mesetas - Meta, Colombia
27/12/2019 - 11:18 AM	3,432	-74,230	3,0	4	13	Mesetas - Meta, Colombia
27/12/2019 - 06:29 PM	3,448	-74,180	2,2	4	4	Mesetas - Meta, Colombia
27/12/2019 - 08:16 PM	3,415	-74,167	2,7	4	4	Mesetas - Meta, Colombia
28/12/2019 - 01:03 AM	3,410	-74,177	2,4	5	7	Mesetas - Meta, Colombia
28/12/2019 - 02:20 AM	3,437	-74,157	3,6	4	15	Mesetas - Meta, Colombia
29/12/2019 - 09:38 PM	3,49	-74,216	2,3	4	4	Mesetas - Meta, Colombia
30/12/2019 - 12:08 AM	3,432	-74,199	2,9	4	4	Mesetas - Meta, Colombia
31/12/2019 - 12:05 AM	3,416	-74,171	2,1	2	1	Mesetas - Meta, Colombia
31/12/2019 - 12:32 AM	3,468	-74,187	3,2	5	14	Mesetas - Meta, Colombia
31/12/2019 - 04:22 AM	3,473	-74,174	3,6	4	20	Mesetas - Meta, Colombia
01/01/2020 - 06:15 AM	3,471	-74,184	3,5	3	2	Mesetas - Meta, Colombia
01/01/2020 - 12:53 PM	3,44	-74,202	2,6	3	1	Mesetas - Meta, Colombia
01/01/2020 - 02:17 PM	3,427	-74,184	2,3	4	2	Mesetas - Meta, Colombia
01/01/2020 - 09:50 PM	3,43	-74,216	2,8	2	4	Mesetas - Meta, Colombia
05/01/2020 - 04:25 AM	3,430	-74,231	3,0	3	4	Mesetas - Meta, Colombia
07/01/2020 - 11:56 PM	3,428	-74,226	2,3	2	1	Mesetas - Meta, Colombia
08/01/2020 - 09:42 PM	3,434	-74,189	3,8	4	47	Mesetas - Meta, Colombia
09/01/2020 - 06:24 PM	3,439	-74,165	2,6	2	2	Mesetas - Meta, Colombia
14/01/2020 - 11:32 PM	3,415	-74,201	3,1	2	4	Mesetas - Meta, Colombia
23/01/2020 - 07:51 AM	3,407	-74,19	2,2	4	1	Mesetas - Meta, Colombia

El sismo de Mesetas - Meta del 24 de diciembre de 2019. Aspectos sismológicos, movimiento fuerte y consideraciones geodésicas

Fecha y hora local	Lat (°).	Long (°).	Mag.	Intensidad máxima	# reportes	Epicentro
23/01/2020 - 01:29 PM	3,451	-74,189	2,3	2	1	Mesetas - Meta, Colombia

Fuente: autores

Reportes de daño en edificaciones: por medio del aplicativo web, los usuarios también reportaron daños que observaron en edificaciones en las que se encontraban. En la tabla 10, se detallan estos datos, pero cabe aclarar que esta información no ha sido objeto de verificación.

Tabla 10. Poblaciones en las que los usuarios reportaron daños

Centro poblado	Departamento	# reportes con daño	Tipo de daño
Alpujarra	Tolima	2	Fisuras en muros
Ataco	Tolima	1	
Baraya	Huila	1	
Cali	Valle del Cauca	5	Fisuras en muros
Caloto	Cauca	1	
Cáqueza	Cundinamarca	1	
Carmen de Apicalá	Tolima	1	
Facatativá	Cundinamarca	1	
Girardot	Cundinamarca	2	Fisuras en muros
Guamal	Meta	1	
La Plata	Huila	1	
Líbano	Tolima	1	
Medellín	Antioquia	2	
Mosquera	Cundinamarca	1	
Ortega	Tolima	1	
Palmira	Valle del Cauca	2	
Pereira	Risaralda	3	
Restrepo	Meta	1	
Sibaté	Cundinamarca	1	
Yaguará	Huila	1	
Pitalito	Huila	1	
Valle de San Juan	Tolima	1	Caída de tejas
Acevedo	Huila	1	Fisuras y grietas en muros
Acacías	Meta	2	
Coello	Tolima	1	
Cumaral	Meta	1	
Dosquebradas	Risaralda	1	
Granada	Meta	2	
Jamundí	Valle del Cauca	1	
Manizales	Caldas	1	
Neiva	Huila	2	
Ricaurte	Cundinamarca	1	
Soacha	Cundinamarca	3	
Tunja	Boyacá	2	
Villavicencio	Meta	6	
Vistahermosa	Meta	1	

El sismo de Mesetas - Meta del 24 de diciembre de 2019. Aspectos sismológicos, movimiento fuerte y consideraciones geodésicas

Centro poblado	Departamento	# reportes con daño	Tipo de daño
Armenia	Quindío	7	Fisuras, grietas y caída de revestimiento en los muros
Bogotá D.C.	Bogotá	27	
Chía	Cundinamarca	2	
Ibagué	Tolima	4	
Lejanías	Meta	3	Fisuras, grietas y caída de revestimiento en los muros y caída de tejas
Mesetas	Meta	7	
Total		107	

Fuente: autores

Formularios en formato análogo: se recibieron algunos formularios en formato análogo que fueron diligenciados de manera presencial con la población, los cuales permitieron evaluar nuevos valores de intensidad o corroborar los evaluados automáticamente mediante el aplicativo web, mencionado anteriormente. Los sitios de los cuales se recibieron formularios fueron:

- Uribe (Meta): se recibieron 12 formularios, en los cuales se reportó que personas que estaban dormidas se despertaron y la gente se asustó y corrió a la calle; hubo vibración de puertas y ventanas, balanceo de objetos colgantes, vertimiento de líquidos y caída de objetos livianos, por lo cual se asignó valor de intensidad 5. Para este municipio no se habían recibido formularios mediante el aplicativo web y por lo tanto, es un nuevo valor de intensidad que complementa el mapa de intensidades.

- El Calvario (Meta): se recibieron nueve formularios por parte del Consejo Municipal para la Gestión del Riesgo de Desastres, los cuales se analizaron y se estimó intensidad 5, debido a que mucha gente se asustó y corrió a la calle y se observaron efectos en los objetos como balanceo de objetos colgantes, vibración de vidrios y porcelanas y caída de objetos livianos. Para este municipio no se habían recibido formularios mediante el aplicativo web y por lo tanto, es un nuevo valor de intensidad que complementa el mapa de intensidades.

- Lejanias (Meta): se recibieron 72 formularios y varias fotografías remitidas por la Secretaría de Planeación e Infraestructura del municipio, en los cuales se reportó que muchas personas tuvieron pánico, perdieron el equilibrio y tuvieron dificultad para mantenerse de pie, sin embargo, pocas reportaron haber salido a la calle. Hubo balanceo de objetos colgantes, ruido y vaivén de puertas y ventanas, golpeteo de objetos como porcelana, vasos y frascos, vertimiento de líquidos y se reportó haber visto ondulaciones en el terreno. En algunos casos se observó el desplazamiento de objetos y reacción de susto en animales.

- Teruel (Huila): se recibieron cinco formularios escaneados por parte de la Secretaría de Planeación del municipio, en los cuales se reportó que la gente se alarmó y salió a la calle;

hubo balanceo de objetos colgantes y vibración y caída de objetos livianos. También se reportaron fisuras y grietas en los muros de algunas edificaciones, pero esa información no ha sido verificada por expertos. La intensidad evaluada tanto en el aplicativo web como en los formularios escaneados para este municipio, es 5.

- Rivera (Huila): se recibió un formulario escaneado, en el cual se reportaron efectos leves en los objetos, lo cual está acorde con la intensidad evaluada automáticamente mediante el aplicativo web (4).

En la totalidad de los reportes se hizo mención de daños en las construcciones, la mayoría de ellos incluían fisuras en revestimiento, grietas en muros, caída de tejas y grietas en la unión de columnas y vigas, tal y como se observa en la figura 17, la cual contiene algunas fotografías remitidas por la Secretaría de Planeación e Infraestructura del municipio. Se reportó en pocos casos colapso parcial de estructuras, como baños, cocinas, cocheras de cerdos o muros divisorios (figura 18). Sin embargo, es importante resaltar que los daños incluidos en los formularios no han sido evaluados por personal experto.

En cuanto a efectos en la naturaleza, se reportaron grietas en el suelo y deslizamientos ubicados en la parte alta del municipio o en proximidades de las viviendas, pero no se especificó la dimensión de los mismos. Algunas fotografías de los mismos se presentan en la figura 19.

Dentro de otras observaciones se incluyen las continuas réplicas sentidas por la población y la percepción de un ruido de la tierra al momento del sismo. La intensidad evaluada tanto en el aplicativo web como en los formularios análogos para este municipio, fue 6.

El sismo de Mesetas - Meta del 24 de diciembre de 2019. Aspectos sismológicos, movimiento fuerte y consideraciones geodésicas

	
<p>Grieta en un muro de la alcaldía de Lejanías</p>	<p>Agrietamiento de un muro en la escuela de la vereda "Guarumal"</p>

Figura 17. Agrietamiento de edificaciones en Lejanías (Meta)

Fuente: secretaría de Planeación e Infraestructura de Lejanías

	
<p>Colapso parcial de un muro de adobe en la escuela de la vereda "La Cabaña"</p>	<p>Colapso de un muro de bahareque en la vereda "Cafetales"</p>

Figura 18. Colapso parcial de muros en Lejanías (Meta)

Fuente: secretaría de Planeación e Infraestructura de Lejanías



Figura 19. Efectos en la naturaleza reportados en Lejanías (Meta)

Fuente: secretaría de Planeación e Infraestructura de Lejanías

8. MAPAS DE INTENSIDADES INSTRUMENTALES

En los mapas de intensidad instrumental (*shakemap*) se muestran gráficamente el movimiento del terreno y posibles efectos causados por un sismo, expresados en niveles de intensidad sísmica, a partir de la combinación de registros de aceleraciones en sismómetros y acelerógrafos, relaciones de atenuación de la energía sísmica e información sobre condiciones sísmicas locales, se utiliza la Escala de Mercalli modificada (MMI).

A continuación, se presentan los mapas de intensidades instrumentales asociados al sismo principal y a las dos réplicas de mayor magnitud.

El sismo de Mesetas - Meta del 24 de diciembre de 2019. Aspectos sismológicos, movimiento fuerte y consideraciones geodésicas

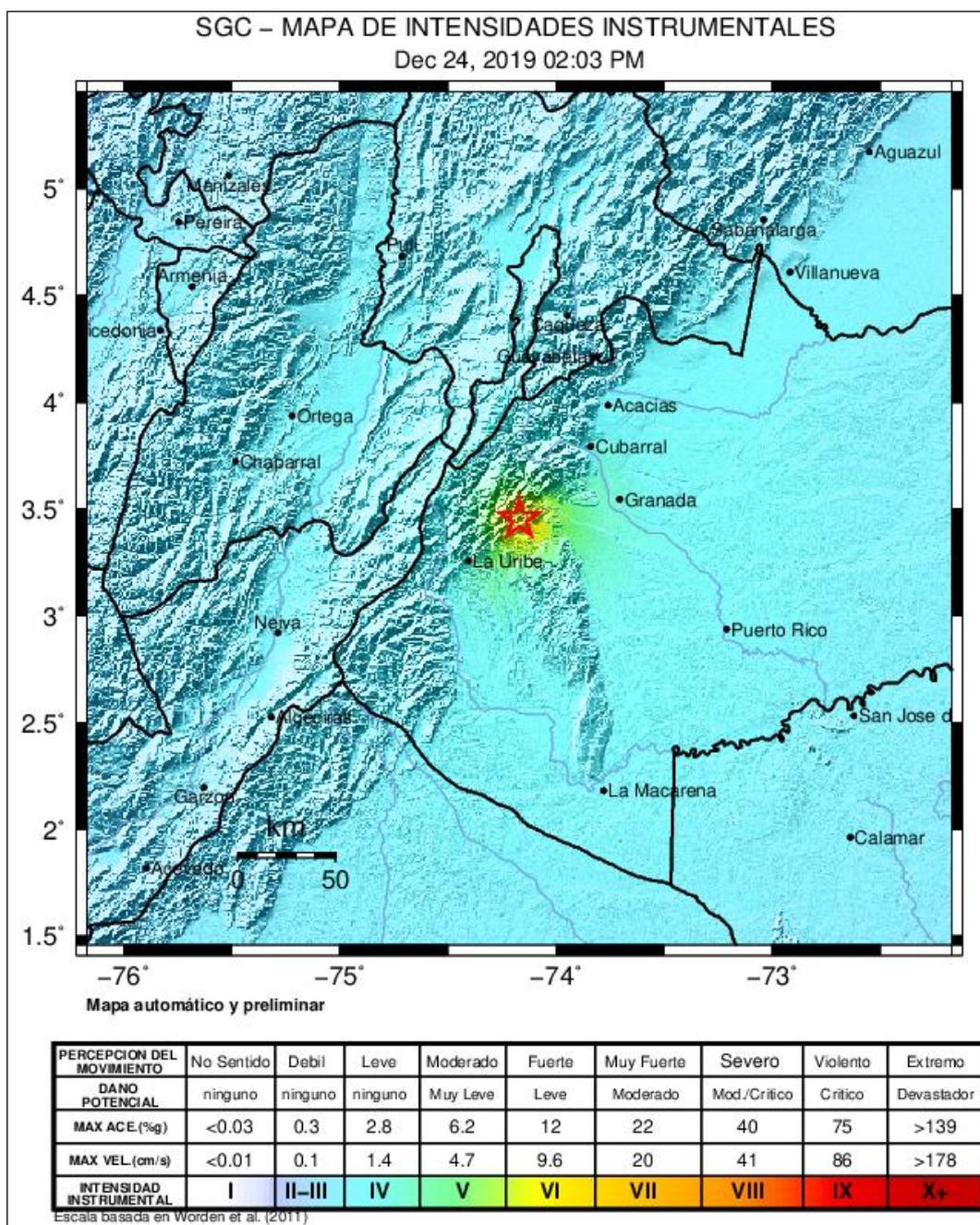


Figura 20. Mapa de intensidades instrumentales sismo con Magnitud 6,0
2019-12-24 14:03 Hora Local (2019-12-24 19:03 UTC)

Fuente: autores

El sismo de Mesetas - Meta del 24 de diciembre de 2019. Aspectos sismológicos, movimiento fuerte y consideraciones geodésicas

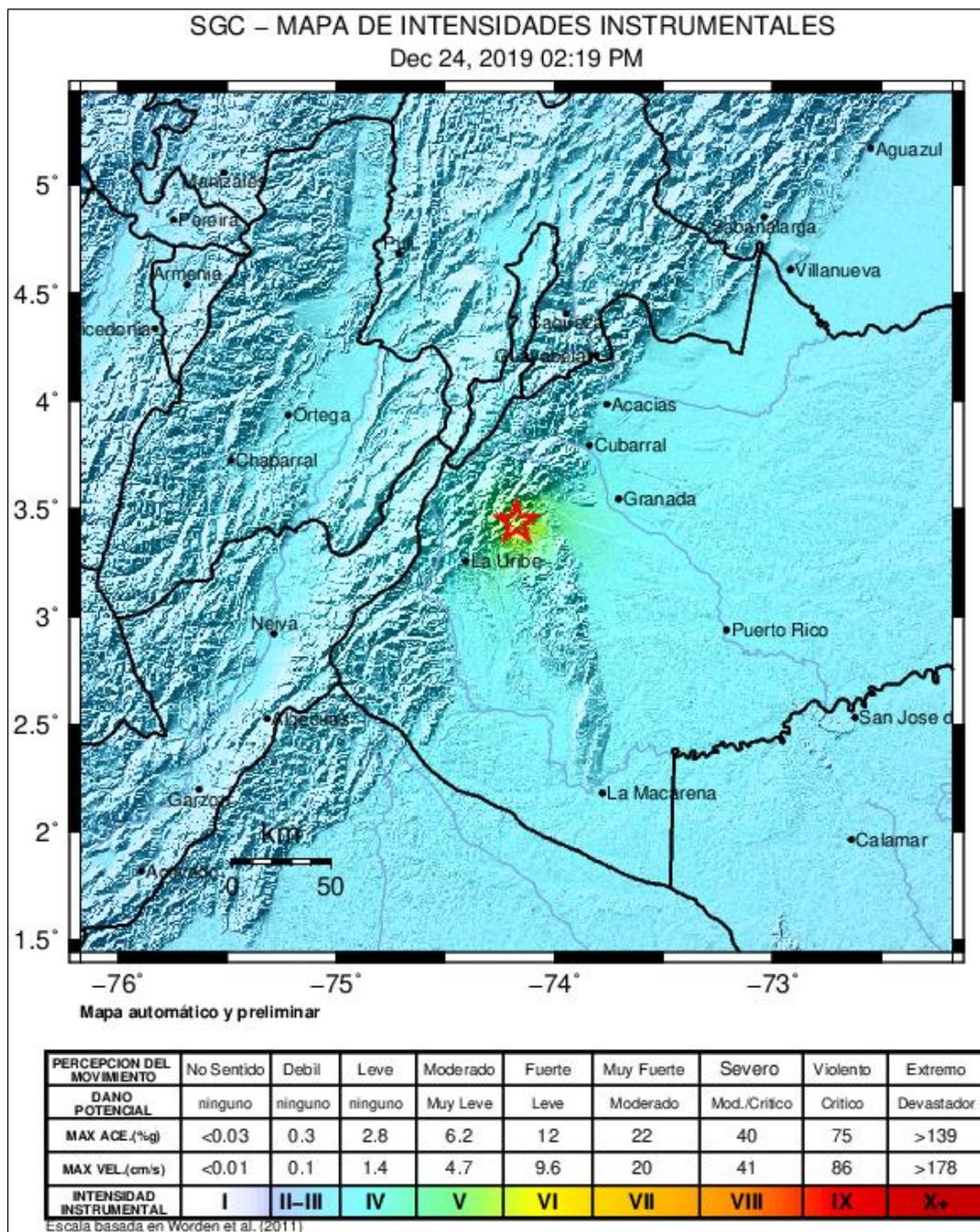


Figura 21. Mapa de intensidades instrumentales sismo con Magnitud 5,8
2019-12-24 14:19 Hora Local (2019-12-24 19:19 UTC)
Fuente: autores

El sismo de Mesetas - Meta del 24 de diciembre de 2019. Aspectos sismológicos, movimiento fuerte y consideraciones geodésicas

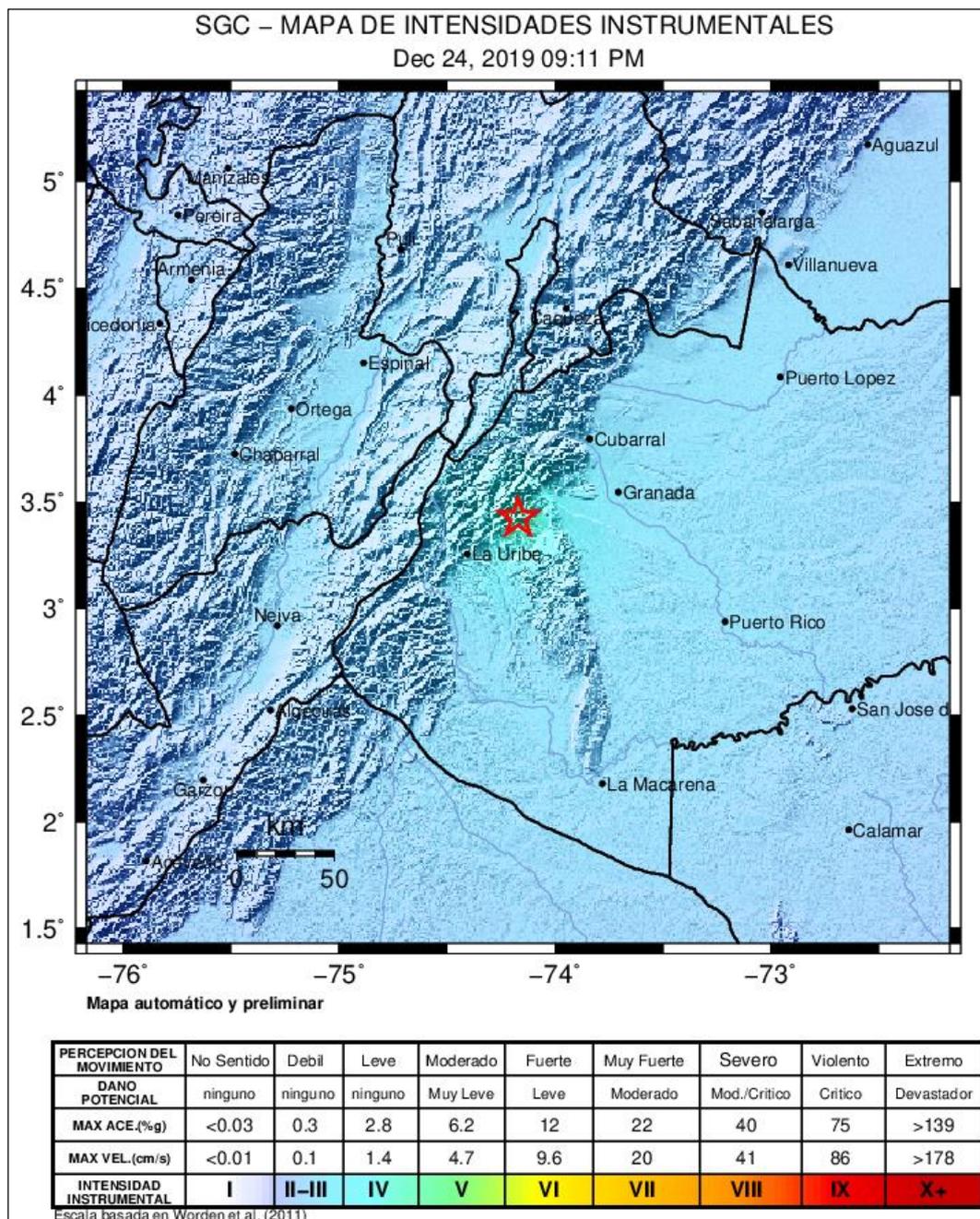


Figura 22. Mapa de intensidades instrumentales sismo con Magnitud 4,7
2019-12-24 21:11 Hora Local (2019-12-25 02:11 UTC

Fuente: autores

9. ANÁLISIS GEODÉSICO DE POSICIONAMIENTO

Se presenta un análisis preliminar correspondiente al comportamiento de estaciones geodésicas GPS permanentes de operación continua, empleando técnicas de posicionamiento estático y de posicionamiento cinemático de tasa alta de muestreo (1Hz).

Localización de estaciones

Las estaciones consideradas para este análisis son las estaciones AEBS (Aeropuerto Benito Salas, Neiva), BP01 (Bogotá, Servicio Geológico Colombiano), VNEI (Vereda San Jorge, Neiva), VPOM (Alto Pompeya, Villavicencio), VSOA (Soacha) y VZPQ (Zipaquirá), Las distancias de estas estaciones con respecto a la localización del epicentro son 133, 134, 125, 114, 130 y 177 km respectivamente, figura 23.

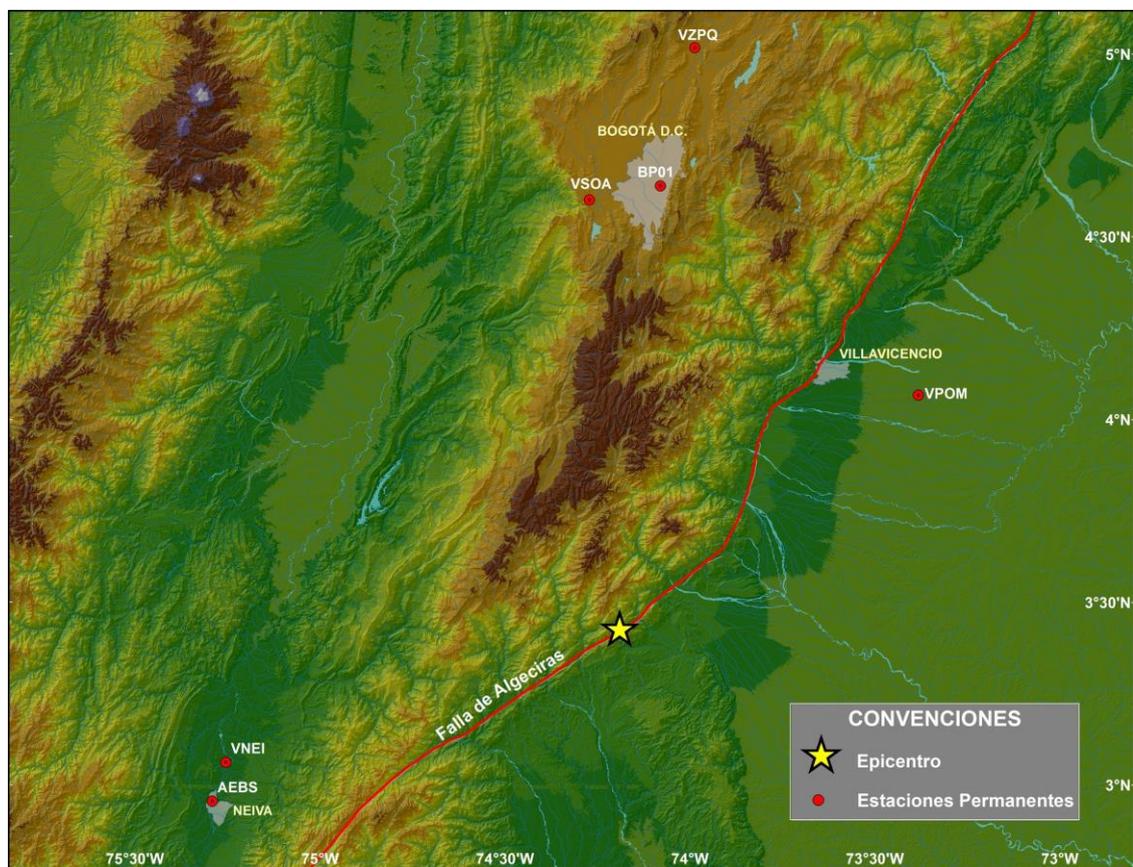


Figura 23. Localización de estaciones GPS permanentes
Polígono en coordenadas geográficas
Fuente: autores

El sismo de Mesetas - Meta del 24 de diciembre de 2019. Aspectos sismológicos, movimiento fuerte y consideraciones geodésicas

La figura 24 muestra las velocidades geodésicas de las estaciones GPS anteriormente mencionadas con respecto a la placa suramericana como fija, expresadas en el Marco Internacional Terrestre de Referencia ITRF2008. La estación AEBS no es objeto de estimación de velocidad porque no cumple aún con la condición de contar con 2,5 años de observación de datos, de acuerdo a consenso internacional, con el fin de garantizar la confiabilidad de los resultados. Se representa en el mapa de esta figura el trazo de la Falla de Algeciras y la localización epicentral del sismo. La estimación de las velocidades con respecto a la placa suramericana se realiza empleando el modelo utilizado en Mora-Páez et al. (2019). La estación VPOM no indica velocidad geodésica al estar localizada sobre la placa suramericana.

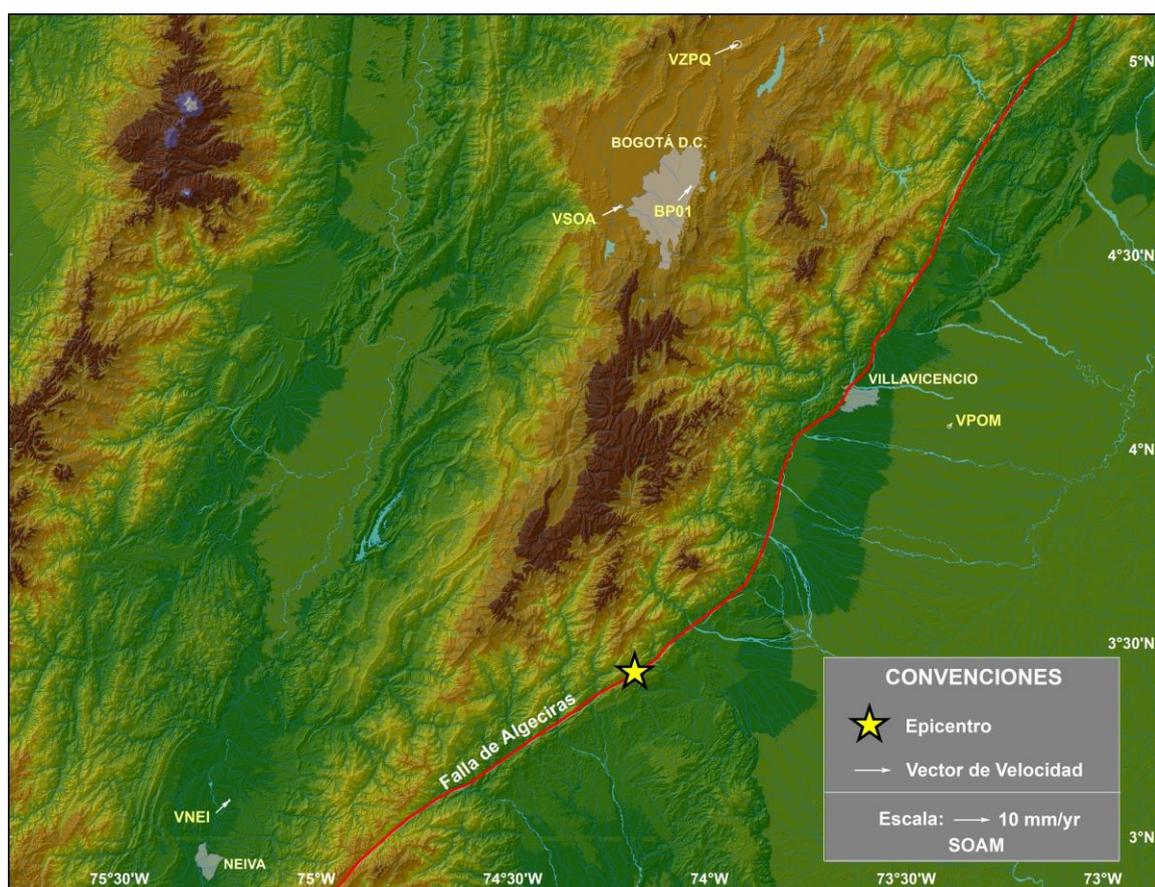


Figura 24. Campo regional de velocidades con respecto a Suramérica
Fuente: ITRF, 2008.

Posicionamiento estático GPS

Los datos obtenidos en cada una de las estaciones GPS son objeto de análisis de calidad y convertidos del formato del receptor al formato universal RINEX mediante el empleo del software TEQC (Translating, Editing, Quality-Check) desarrollado por UNAVCO, (Estey and Meertens, 1999).

Mediante el uso del software GIPSY-X, desarrollado por JPL-NASA-CALTECH (Bertiger et al., 2010; Zumberge et al., 1997), empleado por el Grupo de Investigaciones Geodésicas Espaciales, se calculan, mediante la estrategia de procesamiento estático PPP (*Precise Point Positioning*), las posiciones diarias finales geocéntricas 3D, incorporando modelos troposféricos y de carga oceánica, así como órbitas corregida. Estas posiciones diarias son transformadas al marco de referencia ITRF2008 (Altamimi et al., 2011, 2012). Posteriormente, con el software HECTOR versión 1.7.2., (Bos et al., 2013), paquete desarrollado por el Laboratorio de Análisis Geodésico Espacial y Terrestre de la Universidad del Interior de Beira, Portugal, se incluyeron datos obtenidos hasta el 28 de diciembre de 2019 y se estimaron los posibles *offsets* asociados al evento sísmico, y así poder establecer posibles desplazamientos estáticos.

La tabla 11 muestra las estimaciones de los desplazamientos en la posición de la antena en las estaciones GPS en las tres componentes, así como las incertidumbres asociadas a cada componente. Los resultados obtenidos indican que no se aprecian desplazamientos estáticos asociados a la ocurrencia del sismo. Los valores de los *offsets* correspondientes en las tres componentes son inferiores a los valores de las incertidumbres obtenidas.

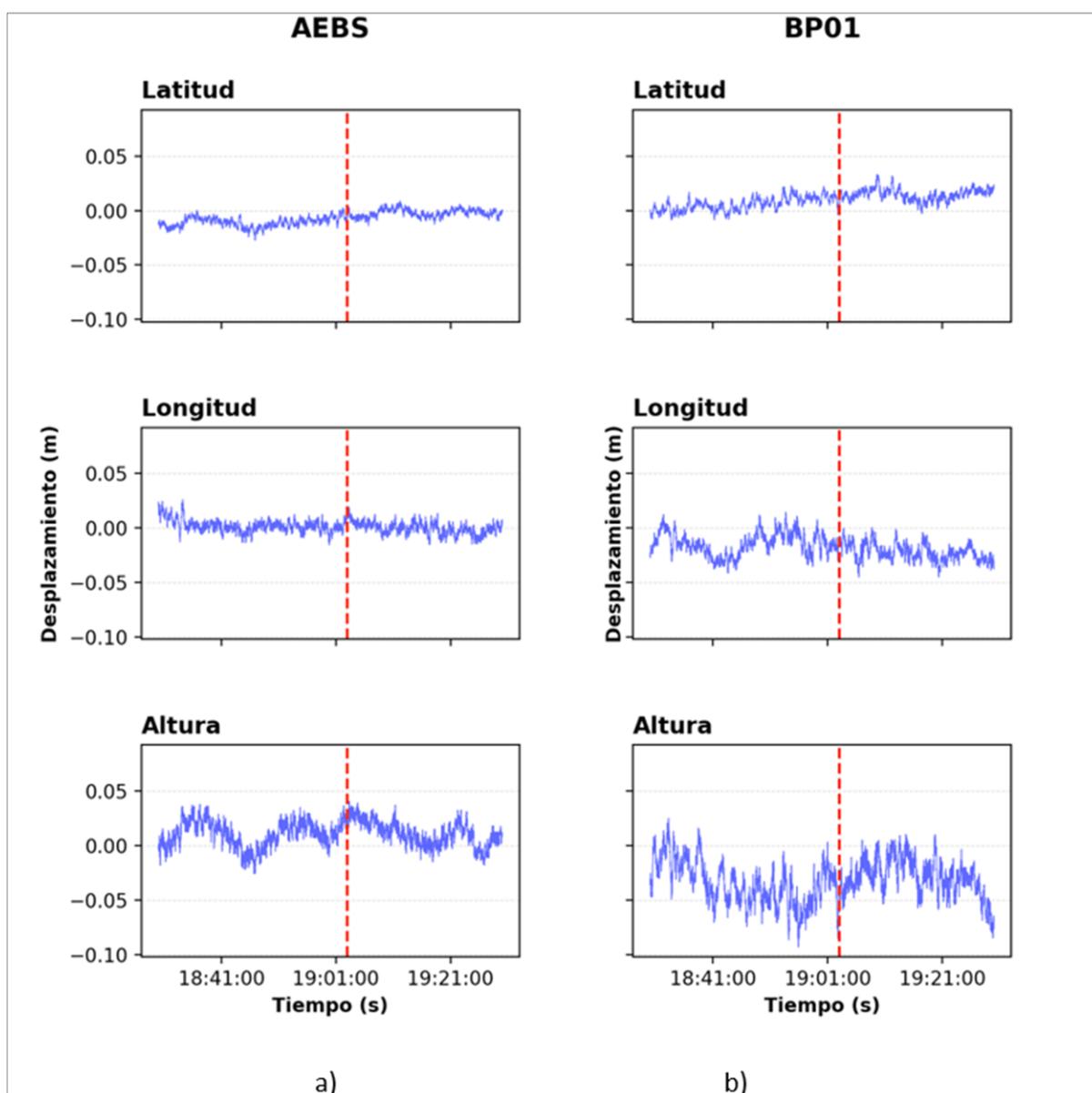
Tabla 11. Valores de *offsets* e incertidumbres estimados en estaciones geodésicas GPS

ID	Norte (mm)			Este (mm)			Vertical (mm)		
	Offset	Incertidumbre	Offset	Offset	Incertidumbre	Offset	Offset	Incertidumbre	Offset
AEBS	-0,85	+/-	0,89	0,24	+/-	0,96	2,73	+/-	2,80
BP01	-1,23	+/-	0,99	0,45	+/-	1,09	-0,55	+/-	2,91
SGCN	-0,83	+/-	0,87	1,11	+/-	0,93	1,17	+/-	2,74
VNEI	-0,13	+/-	0,92	0,76	+/-	0,97	3,34	+/-	3,08
VPOM	-0,43	+/-	0,84	0,47	+/-	0,84	1,84	+/-	2,62
VSOA	0,61	+/-	0,98	0,31	+/-	1,04	3,60	+/-	2,99
VZPQ	-0,03	+/-	0,98	1,02	+/-	0,89	3,50	+/-	2,49

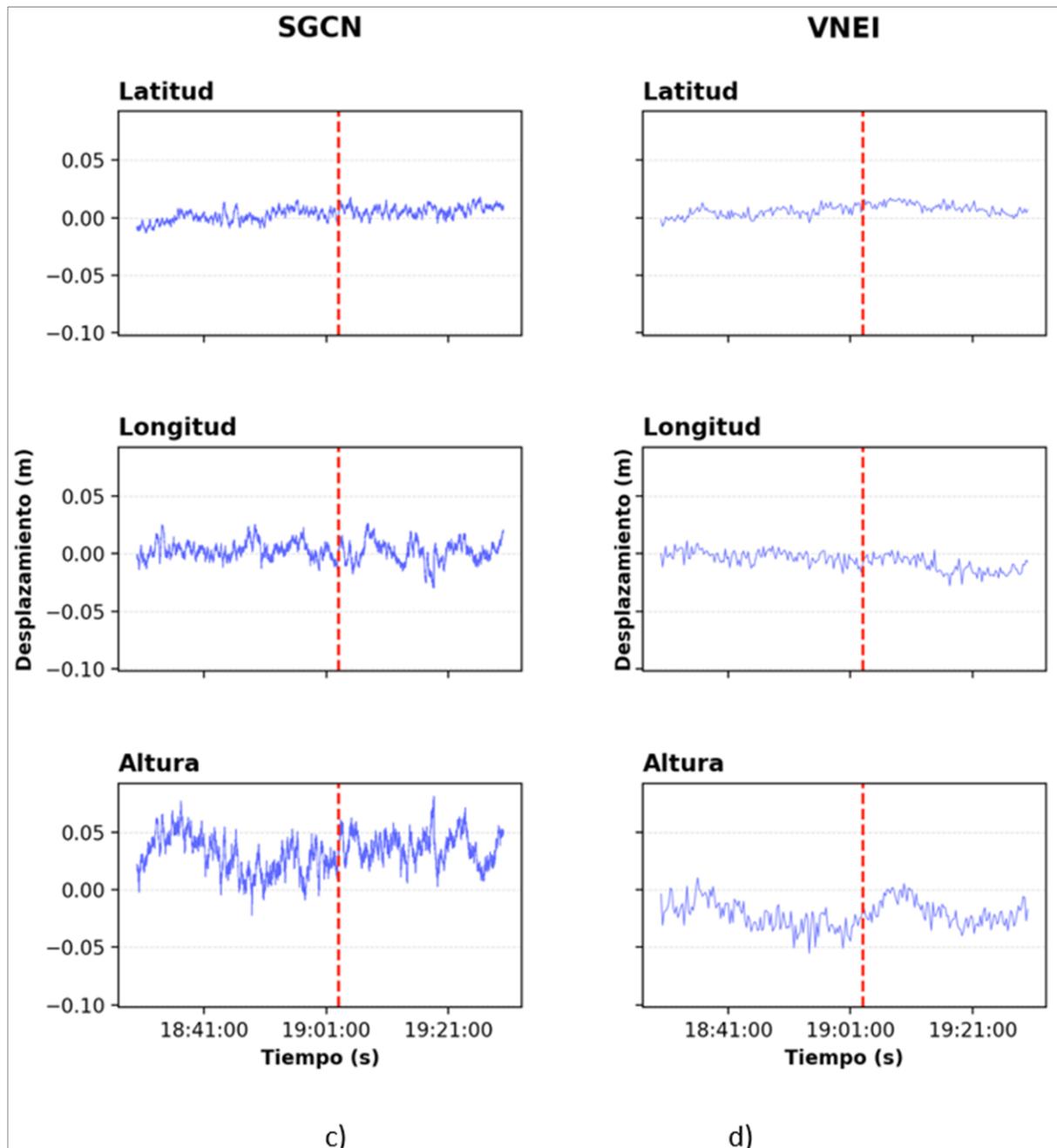
Fuente: autores

Posicionamiento Cinemático GPS

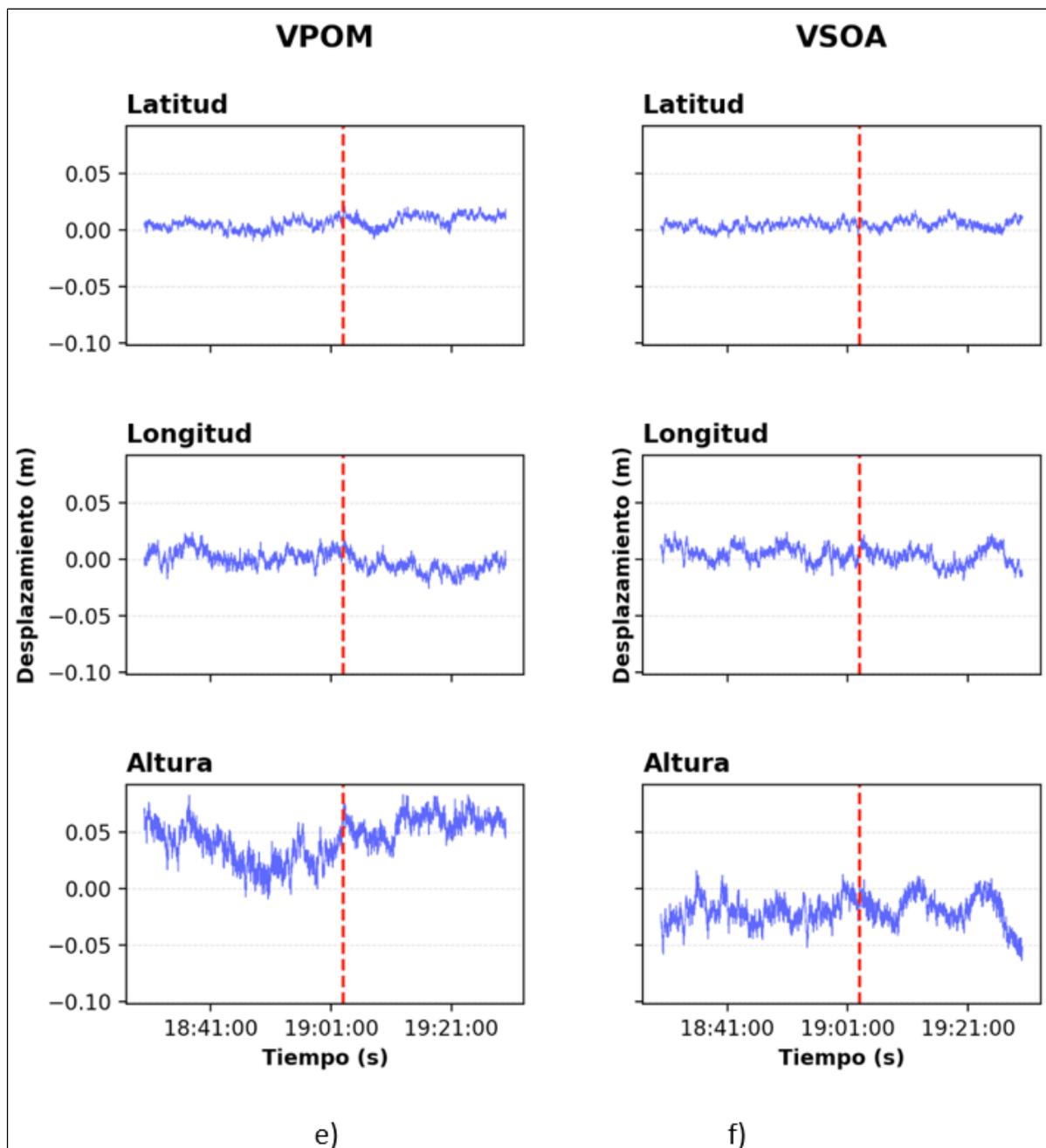
Se realizó el posicionamiento cinemático, mediante la opción cinemático PPP con órbitas finales del software GIPSY, de datos GPS adquiridos cada un segundo (1") en las estaciones AEBS, BP01, SGCN, VNEI, VPOM, VSOA y VZPQ, que permiten observar el comportamiento de las estaciones antes, durante y después del sismo. Las gráficas a), b), c), d), e), f) y g) de la figura 25 muestran las formas de onda de desplazamiento GPS en las tres componentes de cada una de las estaciones anteriormente citadas.



El sismo de Mesetas - Meta del 24 de diciembre de 2019. Aspectos sismológicos, movimiento fuerte y consideraciones geodésicas



El sismo de Mesetas - Meta del 24 de diciembre de 2019. Aspectos sismológicos, movimiento fuerte y consideraciones geodésicas



El sismo de Mesetas - Meta del 24 de diciembre de 2019. Aspectos sismológicos, movimiento fuerte y consideraciones geodésicas

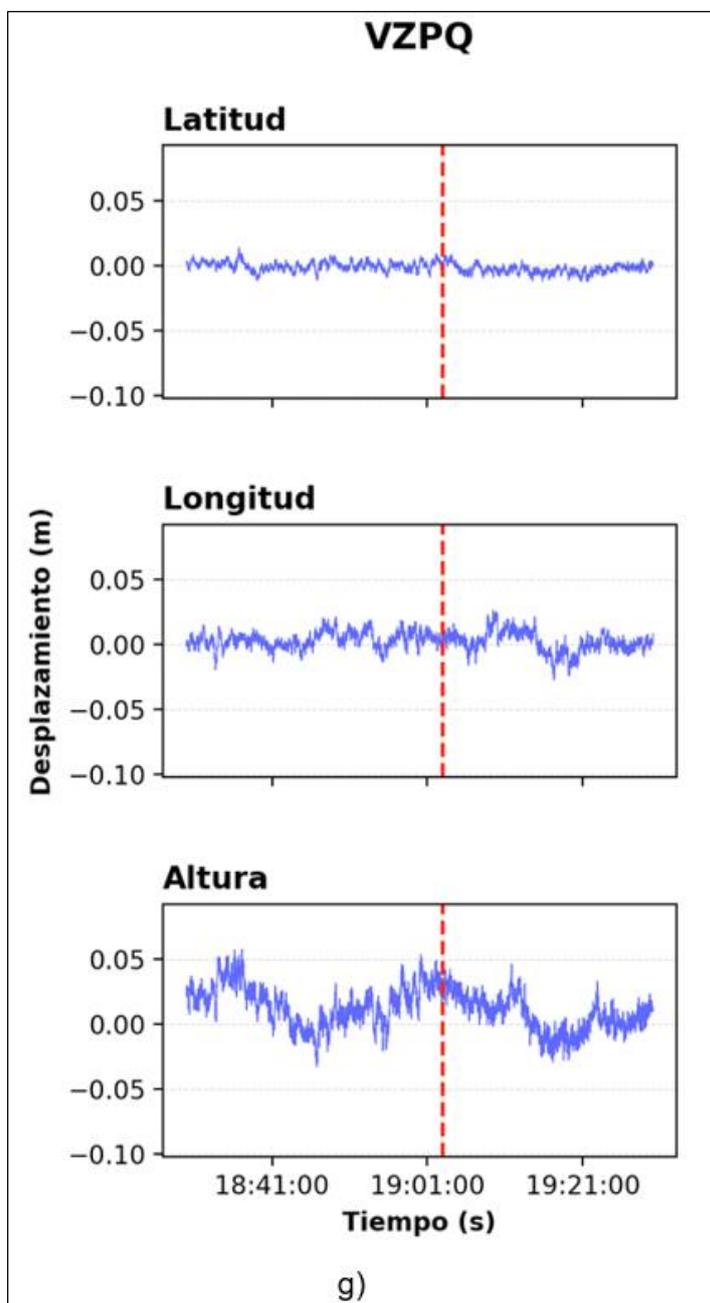


Figura 25. Posicionamiento cinemático de datos GPS de las estaciones. Estaciones AEBS BP01, SGCN, VNEI, VPOM, VSOA y VZPQ en las figuras a), b), c), d), e), f) y g) respectivamente. Adquiridos a tasa de muestreo de 1 segundo, 30 minutos antes y 30 minutos después de la ocurrencia del sismo. La línea vertical indica el tiempo de ocurrencia del sismo. La escala vertical de las figuras está en metros
Fuente: autores

CONCLUSIONES

Los parámetros de la fuente calculados para los sismos de mayor magnitud son consistentes con una tendencia dominante en el movimiento de rumbo dextral, con componente inverso. Esto es coherente con su ubicación en la zona de transferencia entre los sistemas de fallas de Algeciras y Guaicáramo, donde se ha documentado una zona duplex transpresiva. Además, coincide con estrías de rumbo medidas en la zona y con la geomorfología descrita alrededor de la falla, escarpes, abanicos aluviales desplazados y represados, crestas de presión, drenajes desviados y decapitados; aspectos que en conjunto indican el movimiento lateral derecho del sistema de Fallas.

Las soluciones del tensor de momento sísmico calculadas para los sismos de mayor magnitud por medio de diferentes métodos y software son coherentes con desplazamiento lateral o de rumbo dextral, con componente inverso.

Las estaciones Lejanías, Meta –CLEJA– y La Uribe, Meta –URMC–, las más cercanas al epicentro, entre 19 y 31 km de distancia, registraron los mayores valores de aceleración horizontal media de 185,89 y 160,77 cm/s^2 respectivamente. La estación CLEJA registró la aceleración máxima en su componente vertical, con un valor de 261,24 cm/s^2

El IDIGER, entidad operadora de la Red de Acelerógrafos de Bogotá, registró las máximas aceleraciones en las estaciones de Bomberos Marichuela –CMARI– de 20 cm/s^2 a una distancia epicentral de 120,45 km y 19,8 cm/s^2 en la estación Usaquén –CUSAQ– a una distancia epicentral 142,86 km.

La intensidad máxima reportada y evaluada fue 6 y fue evaluada en municipios cercanos al epicentro como Fuente de Oro, Puerto Concordia, El Dorado, Lejanías, Villavicencio y Mesetas (Meta), donde se sintió muy fuerte, hubo vibración y caída de objetos y se reportaron daños leves en algunas construcciones.

La intensidad macrosísmica máxima reportada fue de 6 –Daño Leve – y la intensidad máxima instrumental 6.

Los resultados de las mediciones en las estaciones geodésicas permanentes de operación continua no evidencian desplazamientos estáticos asociados al sismo, considerando que los valores de amplitud estimados son inferiores a los valores de las incertidumbres. Se estimaron las formas de onda de desplazamiento en la posición de las antenas en las estaciones GPS a partir del cálculo de posicionamiento cinemático PPP, observándose variaciones del orden centimétrico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, J., Lonergan, L., y Coward, M.P. (2004). Oblique transpression in the western thrust front of the Colombian Eastern Cordillera. *Journal of South American Earth Sciences*, 17(3), 181-194. Doi: 10.1016/j.jsames.2004.06.002.
- Altamimi Z., L. Métivier., y X. Collilieux (2012). ITRF2008 plate motion model. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, 117, B07402. Doi:10.1029/2011JB008930.
- Altamimi, Z., X. Collilieux., y L. Métivier (2011). ITRF2008: An improved solution of the International Terrestrial Reference Frame. *Journal of Geodesy*, 85(8), 457–473. Doi:10.1007/s00190-011-0444-4.
- Anderson, V.J., Horton, B.K., Saylor, J.E., Mora, A., Tesón, E., Breecker, D.O., y Ketcham, R.A. (2016). Andean topographic growth and basement uplift in southern Colombia: Implications for the evolution of the Magdalena, Orinoco, and Amazon river systems. *Geosphere*, 12(4), 1235-1256. Doi: 10.1130/GES01294.1.
- Bertiger W., S. Desai, B. Haines, N. Harvey, A. Moore, S. Owen., y J. Weiss (2010), Single receiver phase Ambiguity resolution with GPS data. *Journal of Geodesy*. Doi: 10.1007/s00190-010-0371-9.
- Bos M. S., R.M.S. Fernandes, S.D.P. Williams., y L. Bastos, (2013). Fast Error Analysis of Continuous GNSS Observations with Missing Data. *Journal of Geodesy*, Vol 87 (4), 351-360. Doi:10.1007/s00190-012-0605-0.
- Butler, K. (1983). *Andean-type foreland deformation: Structural development of the Neiva Basin, Upper Magdalena Valley, Colombia*. (Ph. D. Thesis). University of South Carolina, Columbia.
- Butler, K. y Schamel, L. (1988). Structure along the eastern margin of the Central Cordillera, Upper Magdalena Valley, Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 1(1), 109-120. Doi: 10.1016/0895-9811(88)90019-3.
- Cediél, F., Shaw, R.P., y Cáceres, C. (2003). *Tectonic assembly of the Northern Andean block*. En: The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon Habitats, Basin Formation and Plate Tectonics. *AAPG Memoir*, 79. Doi: 10.1306/M79877.
- Chorowicz, J., Chotin, P., y Guillaude, R. (1996). The Garzon fault: active southwestern boundary of the Caribbean plate in Colombia. *Geologische Rundschau*, 85, 172-179. Doi: 10.1007/BF00192075.
- Coney, P., y Evenchick, C. (1994). Consolidation of the American Cordilleras. *Journal of South American Earth Sciences*, 7, 241 – 262. Doi: 10.1016/0895-9811(94)90011-6.
- Diederix, H., y Romero, J. (2008). Falla de Algeciras (CO-29H). En: *Proyecto Multinacional Andino: Geociencia para las Comunidades Andinas. Atlas de deformaciones*

cuaternarias de los Andes. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional, No. 7, 320 p., 1 mapa en CD-ROM. Canadá: ISSN 0717-3733.

- Egbue, O., Kellogg, J., Aguirre, H., y Torres, C. (2014). Evolution of the stress and strain fields in the Eastern Cordillera, Colombia. *Journal of Structural Geology*, 58, 8-21. Doi: 10.1016/j.jsg.2013.10.004.
- Ego, F., Sebriera, M., Lavenuc, A., Yepes, H., y Egues, A. (1996). Quaternary state of stress in the northern Andes and the restraining bend model for the Ecuadorian Andes. *Tectonophysics*, 259 (1-3), 101-116. Doi: 10.1016/0040-1951(95)00075-5.
- Estey L. H., y C. M. Meertens, (1999), TEQC: The Multi-Purpose Toolkit for GPS/GLONASS Data, L. H. Estey and C. M. Meertens. *GPS Solutions*, 3 (1) 42-49, John Wiley & Sons. Doi:10.1007/PL00012778.
- Farris, D.W., Jaramillo, C., Bayona, G., Restrepo-Moreno, S.A., Montes, C., Cardona, A., Mora, A., Speakman, R.J., Glascock, M.D., y Valencia, V., (2011), Fracturing of the Panamanian Isthmus during initial collision with South America. *Geology*, v. 39, p. 1007–1010. Doi: 10.1130/G32237.1.
- Gómez, L., Moreno-Sánchez, M., Hincapié, G., Buitrago, J., Cristancho, A., Patiño, A., Zafra, A., Cabrera, J.C., y Quiñonez, C. (2015). *Geología de la Plancha 304-La Uribe*. Elaboración de la cartografía geológica de un conjunto de planchas a escala 1:100.000 ubicadas en cuatro bloques del territorio nacional identificados por el Servicio Geológico Colombiano Grupo 2: Zonas sur A y Zona Sur B. Servicio Geológico Colombiano. 102 p.
- Grünthal, G., (2009). *Escala Macrosísmica Europea 1998. Edición Española, F. Lorenzo Martín. Conseil De L'Europe, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*. Luxembourg: edición española F Lorenzo Martín.
- Gutscher, M.A., Malavieille, J., Lallemand, S., y Collot, J.Y. (1999). Tectonic segmentation of the North Andean margin: Impact of the Carnegie Ridge collision. *Earth and Planetary Science Letters*, 168(3-4), 255-70. Doi: 10.1016/S0012-821X(99)00060-6.
- Jiménez, G., Speranza, F., Faccenna, C., Bayona, G., y Mora, A. (2014). Paleomagnetism and magnetic fabric of the Eastern Cordillera of Colombia: Evidence for oblique convergence and nonrotational reactivation of a Mesozoic intracontinental rift. *Tectonics*, 33(11), 2233-2260. Doi: 10.1002/2014TC003532.
- Kanamori, H., y Rivera, L. (2008). Source inversion of W phase: speeding up seismic tsunami warning. *Geophysical Journal International*, 175, pp 222-238. Doi: 10.1111/j.1365-246X.2008.03887.x.
- Kellogg, J., Ogujiofor, I., y Kansakar, D., (1985). *Cenozoic tectonics of the Panama and North Andes blocks*. 6 Congreso Latinoamericano de Geología, *Memoria, vol. I. Ingeominas*, Bogotá.

El sismo de Mesetas - Meta del 24 de diciembre de 2019. Aspectos sismológicos, movimiento fuerte y consideraciones geodésicas

Lonsdale, P. (2005). Creation of the Cocos and Nazca plates by fission of the Farallon plate. *Tectonophysics*, 404(3-4), 237-264. Doi: 0.1016/j.tecto.2005.05.011.

Minson, S., y Dreger, D. (2008). Stable inversions for complete moment tensors. *Geophysical Journal International*, 174, pp 585-592. Doi: 10.1111/j.1365-246X.2008.03797.x.

Montes, C., Bayona, G., Cardona, A., Buchs, D.M., Silva, C.A., Morón, S., Hoyos, N., Ramírez, D.A., Jaramillo, C.A., y Valencia, V. (2012). Arc-continent collision and orocline formation: Closing of the Central American seaway. *Journal of Geophysical Research*, 117, B04105. Doi: 10.1029/2011JB008959.

Montes, N.E., Sandoval, A. y Vergara, H. (2001). *Actividad neotectónica en el Valle Superior del Río Magdalena, entre Girardot y Pitalito (Colombia)*. Informe Interno, Ingeominas, Bogotá.

Mora-Páez H., J. R. Peláez-Gaviria, H. Diederix, O. Bohórquez-Orozco, L. Cardona-Piedrahita, Y. Corchuelo Cuervo, J. Ramírez-Cadena., y F. Díaz-Mila, (2018), Space Geodesy Infrastructure in Colombia for Geodynamics Research. *Seismological Research Letter*, 89 (2A), 446-451. Doi: 10.1785/0220170185.

Mora H., Kellogg J., Freymueller T., Mencin D., Fernandes R., Diederix H., LaFemina P., Cardona L., Lizarazo S., Peláez J., Díaz F., Bohórquez O., Giraldo L., y Corchuelo Y., (2019), Crustal deformation in the northern Andes – A new GPS velocity field. *Journal of South American Earth Sciences*, 89: 76-91, ISSN 0895-9811. Doi: 10.1016/j.jsames.2018.11.002.

Nakano, M., Kumagai, H., y Inoue, H. (2008). Waveform inversion in the frequency domain for the simultaneous determination of earthquake source mechanism and moment function. *Geophysical Journal International*, 173, pp 1000-1011. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2008.03783.x>.

Page, W.D. (1986). *Seismic geology and seismicity of Northwestern Colombia*. Woodward-Clyde Consultants Report for ISA and Integral Ltda., Medellín.

París, G. y Romero, J. (1994). Fallas activas en Colombia. *Boletín Geológico*, 34(2-3), 1-53.

París, G., Machette, M.N., Dart, R. y Haller, K.M. (2000). *Map and database of Quaternary faults and folds in Colombia and its offshore regions*. U.S. Geological Survey.

Patiño, A., Quiñones, C., Cristancho, A., Zafra, M. y Cabrera, J. C. (2015). *Mapa Geológico de la plancha 304 La Uribe*. Escala 1:100 000. Servicio Geológico Colombiano.

Pennington, W., (1981). Subduction of the eastern panama basin and seismotectonics of northwestern South America. *Journal of Geophysical Research*, 86, 10753 – 10770. Doi: 10.1029/JB086iB11p10753.

El sismo de Mesetas - Meta del 24 de diciembre de 2019. Aspectos sismológicos, movimiento fuerte y consideraciones geodésicas

Sarmiento-Rojas, L.F., Van Wess, J.D. y Cloetingh, S. (2006). Mesozoic transtensional basin history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes: Inferences from tectonic models. *Journal of South American Earth Sciences*, 21(4), 383-411. Doi: 10.1016/j.jsames.2006.07.003.

Servicio Geológico Colombiano. (2020). *Catálogo Mecanismo Focal y Tensor Momento*. Disponible en: https://bdrsnc.sgc.gov.co/sismologia1/sismologia/focal_seiscomp_3/index.html

Servicio Geológico Colombiano. (2020). *Sistema de Información de Sismicidad Histórica de Colombia*. Disponible en: <http://sish.sgc.gov.co/visor/>

Spikings, R.A., Winkler, W., Seward, D., y Handler, R. (2001). Along-strike variations in the thermal and tectonic response of the continental Ecuadorian Andes to the collision with heterogeneous oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 186(1), 57-73. Doi: 10.1016/S0012-821X(01)00225-4.

Trenkamp, R., Kellogg, J., Freymueller, J., y Mora, H., (2002). Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations. *Journal of South American Earth Sciences*, 15, 157 – 171. Doi: 10.1016/S0895-9811(02)00018-4.

Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. (25 de diciembre, 2019). Guillermo Escobar, Subdirector para el Manejo de Desastres de la #UNGRD entrega reporte de normalidad en el país tras los eventos sísmicos presentados el día de ayer en el municipio de Mesetas, Meta y sentidos en todo el territorio nacional. @infopresidencia. [Tweet]. Recuperado de <https://twitter.com/UNGRD/status/1209954020984537088>

Velandia, F., Acosta, J., Terraza, R., y Villegas, H. (2005), The current tectonic motion of the Northern Andes along the Algeciras Fault System in SW Colombia. *Tectonophysics*. Doi:10.1016/j.tecto.2004.12.028.

Veloza, G., Styron R., Taylor M., y Morg, A. (2012), Open-source archive of active faults for northwest South America. *GSA Today*, 22, 4–10. Doi:10.1130/GSAT-G156A.1.

Zumberge J.F., M. B. Heflin, D. C. Jefferson, M.M. Watkins., y F. H. Webb (1997), Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, 102. Doi: 10.1029/96JB03860. ISSN: 0148-0227.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de sismos con $M > 2,0$ en el área de Mesetas – Meta	10
Figura 2. Distribución de magnitud para los eventos localizados en Mesetas – Meta	11
Figura 3. Distribución temporal de la generación de sismos	11
Figura 4. Sistema de Fallas de Algeciras –SFA– entre los sectores de Balsillas - Caquetá y Lejanías – Meta	14
Figura 5. Depósitos aluviales (Q2al) controlados por la actividad de la Falla de Algeciras	15
Figura 6. Zona de transferencia entre los sistemas de fallas de Algeciras y Guaicáramo	15
Figura 7. Solución del tensor momento sísmico para los sismos de mayor magnitud entre 2019-12-24 19:00 y 2019-12-30 23:59:59	16
Figura 8. Solución del tensor momento sísmico para los sismos de mayor magnitud entre 2019-12-24 19:00 y 2019-12-30 23:59:59	17
Figura 9. Solución del tensor momento sísmico de los dos sismos en Mesetas - Meta, M_w 6,0 y M_w 5,7 respectivamente, publicados por el GlobalCMT	18
Figura 10. Distribución de estaciones que registraron el evento el 24 de diciembre de 2019, M_w 6,0	23
Figura 11. Distribución de aceleraciones horizontales promedio para las estaciones cercanas al epicentro $REpi < 200$ km	24
Figura 12. Distribución de aceleración en la componente vertical para las estaciones cercanas al epicentro $REpi < 200$ km	24
Figura 13. Acelerograma del evento (M_w 6,0) y espectro de respuesta	25
Figura 14. Distribución de aceleraciones de las réplicas $M \geq 4,5$ en las estaciones contenidas en un área circular de $r \sim 200$ km	29
Figura 15. Localización de sismos históricos asociados a la Falla de Algeciras Falla generadora del evento del 24 de diciembre de 2019	31
Figura 16. Mapa de intensidades reportadas del sismo de $M_w = 6,0$ el 24 de diciembre de 2019 Hora local: 2:03:51 p.m.	35
Figura 17. Agrietamiento de edificaciones en Lejanías (Meta)	41
Figura 18. Colapso parcial de muros en Lejanías (Meta)	41
Figura 19. Efectos en la naturaleza reportados en Lejanías (Meta)	42
Figura 20. Mapa de intensidades instrumentales sismo con Magnitud 6,0	43
Figura 21. Mapa de intensidades instrumentales sismo con Magnitud 5,8	44
Figura 22. Mapa de intensidades instrumentales sismo con Magnitud 4,7	45
Figura 23. Localización de estaciones GPS permanentes	46
Figura 24. Campo regional de velocidades con respecto a Suramérica	47
Figura 25. Posicionamiento cinemático de datos GPS de las estaciones	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros y solución de tensor de momento asociado al sismo 2019-12-24 19:03 UTC Mw=6,0	19
Tabla 2. Parámetros y solución de tensor de momento asociado al sismo 2019-12-24 19:19 UTC Mw=5,8	20
Tabla 3. Parámetros y solución de tensor de momento asociado al sismo 2019-12-24 20:11 UTC Mw=4,3	21
Tabla 4. Valores máximos de aceleración de las estaciones que registraron el evento del 24 de diciembre de 2019 a las 14:03 hora local	22
Tabla 5. Aceleraciones máximas registradas por la RAB del Sismo ocurrido el 24 de diciembre a las 14:03 hora local	25
Tabla 6. Valores de aceleración de las estaciones con registros más altos en las réplicas de magnitud $M \geq 4,5$ en un radio de $R \sim 200$ km centrado en los epicentros	27
Tabla 7. Sismos históricos en la región.	31
Tabla 8. Descripción de valores de intensidad, según la escala EMS-98.	32
Tabla 9. Listado de réplicas reportadas como sentidas.	36
Tabla 10. Poblaciones en las que los usuarios reportaron daños.	38
Tabla 11. Valores de <i>offsets</i> e incertidumbres estimados en estaciones geodésicas GPS	48