







Sismicidad y sismotectónica para el sector norte del ámbito del Sistema de Fallas de Algeciras, Cordillera Oriental, Colombia

Germán Chicangana-Montón^{1*}; Alfonsina Bocanegra-Gómez¹; Jorge Pardo-Mayorga¹
Elkin de Jesús Salcedo-Hurtado²; Augusto Gómez-Capera³; Carlos Alberto Vargas-Jiménez⁴

Forma de citar: Chicangana-Montón, G.; Bocanegra-Gómez, A.; Pardo-Mayorga, J.; Salcedo-Hurtado, E. de J.; Gómez-Capera, A.; Vargas-Jiménez, C.A. (2022). Sismicidad y sismotectónica para el sector norte del ámbito del Sistema de Fallas de Algeciras, Cordillera Oriental, Colombia. *Boletín de Geología*, 44(1), 111-134. <https://doi.org/10.18273/revbol.v44n1-2022005>

Material Suplementario: este artículo tiene Material Suplementario.

Resumen

Al Sistema de Fallas de Algeciras (SFA), se le han asignado cuatro sismos históricos desde finales del siglo XVIII, que en términos de magnitud recalculada desde análisis macrosísmicos tuvieron una magnitud $M > 6.5$. Uno de estos, el del 9 de febrero de 1967, fue registrado instrumentalmente con $M_w 7.2$. En este trabajo se realizó un estudio del sector norte de este sistema de fallas entre los 3° y $4^\circ N$. Entre el 31 de octubre de 2016 y el 18 de julio de 2018, se presentaron cuatro sismos con $M_w > 4.8$, que la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC) localizó en el municipio de Colombia, departamento del Huila, asignándolos a fallas del SFA. Luego, en diciembre 24 de 2019, se presentó un sismo con $M_w 6.0$, que se asignó a la Falla Algeciras perteneciente al SFA en el departamento del Meta. En esta investigación se encontró que los sismos de la región de Colombia se produjeron en las fallas Altamira y Nazareth, las cuales son fallas inversas en un contexto tectono - estratigráfico diferente al SFA. El SFA al norte de los $3^\circ N$ define en esta región el piedemonte llanero. Para las fallas Altamira y Nazareth, los mecanismos focales indicaron fallas inversas, mientras que en la región de Mesetas estos mecanismos obedecieron a fallas transcurrentes concordantes con el SFA. Dada la alta generación de sismos con $M_w > 5.0$ en estas fallas en un lapso inferior a 10 años, se establece que su potencial sismogénico contribuye de manera importante a la amenaza sísmica del centro y el suroccidente de Colombia, sin embargo, en este trabajo se encontró además que la denominada Falla Algeciras, principal componente del SFA por la literatura, está segmentada y no es continua, por lo que se debe reevaluar su potencial sismogénico.

Palabras clave: Sistemas de fallas; Piedemonte llanero colombiano; Sismicidad cortical; Riesgo sísmico.

Seismicity and seismotectonics for the Northern sector of the Algeciras Fault System, Eastern Cordillera, Colombia

Abstract

From the late seventeenth century, the Algeciras Fault System (AFS) has been attributed to four historical earthquakes whose magnitude recalculated from macroseismic scale analysis had a magnitude of $M > 6.5$. One of these, that of February 9th, 1967, was instrumentally registered with a magnitude of $M_w 7.2$. In this work, a study was carried out in the Northern sector of this fault system between 3° and $4^\circ N$. Between October 31st, 2016, and July 18th, 2018, four earthquakes with $M_w > 4.8$, were located by the National Seismological Network of Colombia (NSNC) in the municipality of Colombia, department of Huila, were attributed by them to the AFS. Then, on December 24th, 2019, an earthquake with $M_w 6.0$ was attributed by the NSCS to the Algeciras fault in the department of Meta. This fault is part of the AFS. In accordance with this research, the earthquakes in the region of Colombia occurred in the Altamira and Nazareth Faults, which are reverse faults in a tectono-stratigraphic framework different from the AFS. The AFS toward north of $3^\circ N$ defines the Llanos Foothills in this region. For the Altamira and Nazareth Faults, the earthquake focal mechanisms indicated inverse faults, while in the Mesetas region its earthquake focal mechanisms indicated right lateral strike - slip faults consistent with the AFS. Because of the high generation of earthquakes with $M_w > 5.0$ for these faults in a period of less than 10 years, here it is established that their seismogenic potential contributes in a very important way to the seismic hazard of central and southwestern Colombia. However, in this work it was also found that the so-called Algeciras Fault, the main component of the SFA in the literature, is segmented and not continuous, so its seismogenic potential should be reassessed.

Keywords: Fault Systems; Colombian Llanos Foothills; Crustal Seismicity; Seismic Risk.

¹Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás, Villavicencio, Colombia. (*) germanchicangana@usantotomas.edu.co, alfonsinabocanegra@usantotomas.edu.co, jorgepardo@usantotomas.edu.co

²Universidad del Valle, Cali, Colombia. elkin.salcedo@correounivalle.edu.co

³Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Milano, Italia. antonio.gomez@ingv.it

⁴Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. cavargasj@unal.edu.co

Velandia *et al.* (2005) proponen, igualmente, que hacia el norte, aproximadamente a los 3°30'N de latitud, el SFA empalma y se fusiona con la Falla Guaicaramo, pues esta posee una tendencia estructural y de rumbo similar al SFA. Hacia el occidente de la divisoria de aguas de esta parte de la cordillera y al occidente del SFA se presentan las fallas Altamira y Nazareth (Fuquen y Osorno, 2002), las cuales son de tipo inverso y se emplazan al oriente del municipio de Colombia en el nororiente del departamento del Huila. En esta región se presentaron varios sismos durante el lapso 2016 - 2018. El SFA, de acuerdo con la cartografía geológica del Servicio Geológico Colombiano, se presenta para el departamento del Meta en sentido sur - norte desde el municipio de La Uribe hasta el municipio de Guamal (Aránzazu *et al.*, 2015a, 2015b; Gómez *et al.*, 2015; Patiño *et al.*, 2015a, 2015b).

En este trabajo se realizó un mapa geotectónico soportado principalmente en información secundaria, basada en la cartografía geológica del Servicio Geológico Colombiano, junto con la verificación de imágenes satelitales y en algunos casos datos de campo, para corroborar la información estratigráfica, la presencia de las fallas, su extensión y su geomorfología tectónica para verificar su posible actividad tectónica. De igual manera, en este trabajo se revisó el contexto tectono - estratigráfico de la región del municipio de Colombia, al nororiente del departamento del Huila y del piedemonte llanero en el ámbito del SFA, en el departamento del Meta. Para ambos casos se realizó un análisis sobre el catálogo, especialmente para la sismicidad con focos de profundidad menor a 30 km, la cual fue registrada por la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC), adscrita al Servicio Geológico Colombiano, con el fin de esbozar un modelo sismotectónico que ayude a determinar el alcance de la amenaza sísmica de estas fallas.

Marco geotectónico

La Cordillera Oriental de Colombia es el producto de la inversión tectónica de una antigua depresión estructural compuesta por rocas cuyas edades van desde el Proterozoico hasta el Neógeno (Muñoz-Burbano *et al.*, 2015) (Figura 2). El origen de esta depresión al parecer ocurrió a fines del período Triásico por la separación de Norte y Sur América (Anderson y Schmidt, 1983; Aspden *et al.*, 1992; Mojica y Kammer, 1995; Vinasco *et al.*, 2003; Chicangana, 2005a, 2005b). La cuenca

se extendió desde el sur de Colombia, ensanchándose hacia el norte, hasta donde hoy se ubican los Andes de Mérida, y estaba limitada de E a O por sistemas de fallas normales. Los sedimentos acumulados en la cuenca fueron muy variables; y alcanza hasta 8 km de profundidad (Sarmiento-Rojas *et al.*, 2006). Durante el Cenozoico en el noroccidente de Suramérica se presentó un régimen de tectónica compresiva que dio lugar al cambio del estilo estructural de las fallas que restringen la cuenca, pasando en su conducta cinemática de fallas normales a fallas inversas; este cambio produjo el levantamiento de la Cordillera Oriental. Dos grandes sistemas de fallas en este contexto geológico regional limitan dicha cordillera con las cuencas adyacentes: la del valle del Magdalena al occidente y la de los Llanos al oriente. Estos sistemas de fallas son, respectivamente, el Sistema de Fallas de La Salina al occidente y el denominado por muchos autores como Sistema de Fallas del Piedemonte Llanero (SFP) o lo considerado por París *et al.* (2000) como SFFO al oriente. La sismicidad superficial del piedemonte llanero obedece a la actividad tectónica de las fallas del SFFO. Algunos autores como Mora *et al.* (2006, 2010), Kammer *et al.* (2007), Sánchez-Villar (2011) o Tamara *et al.* (2015), entre otros, asocian el contexto geológico estructural de la Cordillera Oriental con una tectónica de piel delgada que se caracteriza por pliegues de arrastre, fallas ciegas y cabalgamientos de bajo ángulo con rumbo N - NE y buzamientos hacia el O en la parte más oriental y hacia el E en el centro de esta. Junto con esta tendencia, también se observa una tectónica de piel gruesa que involucra al basamento representado por altos estructurales como los macizos de Garzón y Quetame, que afloran gracias al proceso de inversión tectónica que sufrieron fallas normales de alto ángulo durante el lapso Paleógeno tardío - Neógeno.

Esta emergencia del basamento obedeció al ajuste final de la placa de Nazca en su convergencia con el margen noroccidental de Suramérica durante el Neógeno (Chicangana y Vargas, 2013). En la zona de estudio (Figura 2), las unidades tectono - estratigráficas se pueden dividir en dos grupos. El primero está representado por el basamento Proterozoico y las unidades Paleozoicas, en el cual predomina tectónica de piel gruesa principalmente en las regiones orogénicas al oriente. El segundo se constituye de secuencias sedimentarias que abarcan el lapso Jurásico superior - Cenozoico, se caracteriza por tener una tectónica de piel delgada y predomina hacia el flanco occidental de la cordillera.

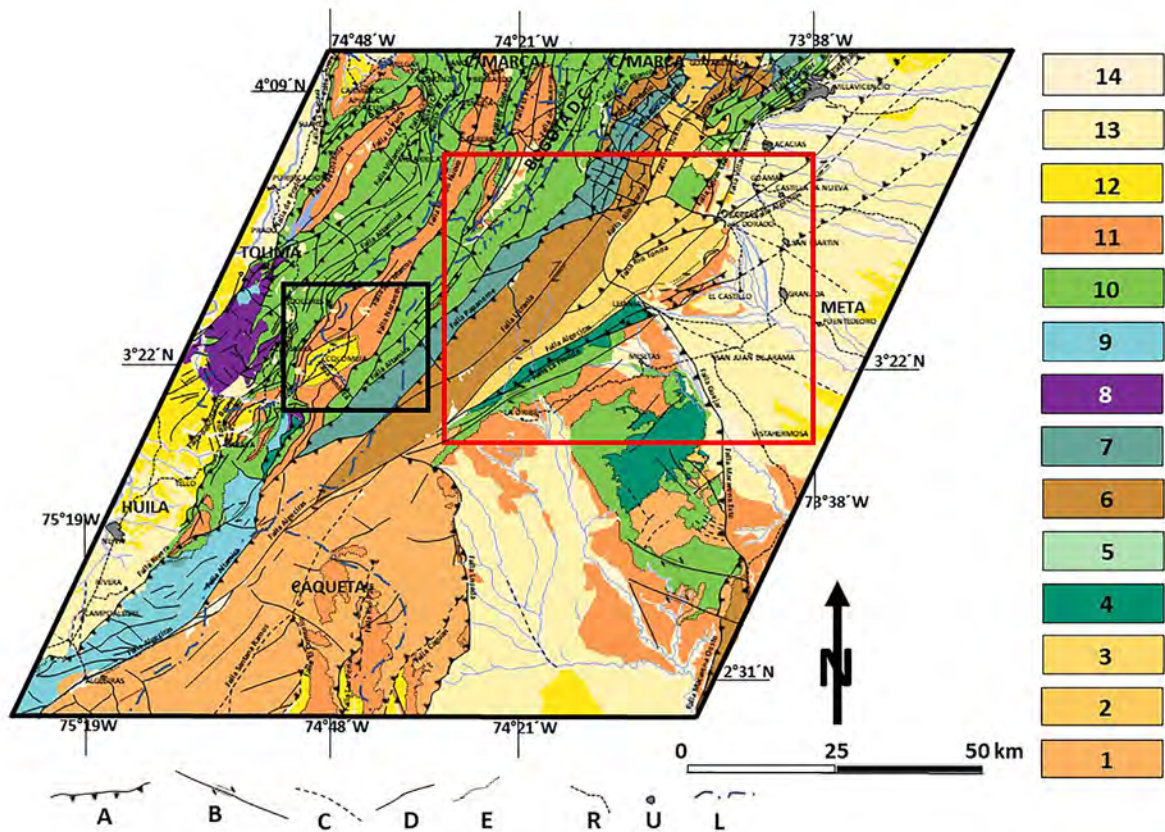


Figura 2. Mapa geológico regional que abarca los sectores central y norte del Sistema de Fallas de Algeciras. El cuadro en negro a la izquierda corresponde a la región del municipio de Colombia, departamento del Huila, y el cuadro en rojo a la derecha, a la zona analizada del piedemonte llanero en el departamento del Meta. La columna de colores a la derecha indica las edades litoestratigráficas: 1. Mesoproterozoico indiferenciado. 2. Criogénico. 3. Ediacárico. 4. Ordovícico. 5. Silúrico. 6. Devónico. 7. Carbonífero. 8. Triásico. 9. Jurásico. 10. Cretáceo. 11. Paleógeno. 12. Neógeno. 13. Cuaternario. 14. Holoceno. A: Cabalgamiento/falla inversa. B: Falla de rumbo. C: Falla inferida. D: Pliegue. E: Discordancia. R: Carretera. U: Ciudad/población. L: Límite departamental. Modificado del Servicio Geológico Colombiano.

En el flanco occidental de la Cordillera Oriental para el municipio de Colombia, noreste del departamento de Huila, se reconocieron unidades sedimentarias con edades que van desde el Carbonífero con la Formación Lodolitas del Cerro Neiva hasta el Mioceno medio con la Formación Arcillolitas de Colombia, la cual está relacionada con la Formación Honda del valle alto del Magdalena. En esta región las unidades correspondientes al Mesozoico y el Cenozoico forman el Sinclinal de Colombia, el cual está fallado y limitado al oriente con rocas de mayor edad por la Falla Altamira (Fuquen y Osorno, 2002; Gómez *et al.*, 2015; Gómez y Montes, 2021). Hacia el oeste de esta falla, predomina una tectónica de piel delgada para las unidades Meso-Cenozoicas, y forman parte de una cuenca retroarco siguiendo aquí lo establecido para la cuenca del alto Magdalena por Butler y Schamel (1988)

y por DeCelles (2012) en su esquema general de los Andes, por citar a algunos. Hacia el sector oriental, que corresponde al piedemonte llanero se constataron, con labor de campo en los municipios de Cubarral, Lejanías y San Juan de Arama, unidades cuya edad abarcó desde el Neoproterozoico hasta el Paleógeno. Las fallas relacionadas al SFA para el piedemonte llanero limitan en sentido E - O con unidades estratigráficas del Paleógeno con el Cretáceo, del Cretáceo con el Neoproterozoico y del Neoproterozoico con el Paleozoico inferior (véase a Aránzazu *et al.*, 2015a, 2015b). Por verificación de campo y con análisis petrográfico para rocas recuperadas en el sitio de la Chorrera en el río Tonoa, en la vereda La Libertad del municipio de Cubarral, el Neoproterozoico consta de rocas relacionadas con el Gabro del Ariari, y las rocas Paleozoicas son filitas relacionadas con la Formación

Guape de Toro-Toro *et al.* (2014). En este lugar no se observaron rocas relacionadas con la Formación Ariari, unidad establecida también por estos últimos autores, la cual aflora en la mina de las Calizas del Ariari en el municipio de El Dorado. A partir del Mioceno superior, cuando la Cordillera Oriental emerge de manera definitiva produciendo la migración de la cuenca de antepaís hacia el E (actuales Llanos Orientales), se producen grandes zonas de cizallamiento transversales y/o normales al rumbo de las fallas NE (fallas antitéticas). Estas cizallas dieron origen a fallas con rumbo NO como la Falla Ambicá en el municipio de Colombia. El desarrollo de la cuenca retroarco explicaría la aparición de fallas transversales al eje de la Cordillera Oriental, que cortan y desplazan los pliegues como el Sinclinal de Colombia. Para verificar el lapso del tiempo geológico en que se desarrolló este tipo de cuenca en esta región, el cual fue entre el Mioceno superior cuando se pliegan unidades como la Formación Arcillolitas de Colombia y el presente, se requiere un estudio posterior que implique, entre otros, análisis sedimentológicos, radiocrométricos y geofísicos.

Sismología reportada para esta región

Además de los sismos históricos a los cuales se les han asignado sus epicentros a partir de estudios macrosísmicos con soporte de documentación histórica; como Espinosa (2004) para el sismo del 16 de noviembre de 1827 y Sarabia *et al.* (2010) para el sismo del 31 de agosto de 1917, y con reporte instrumental de la red global (Ramírez, 1975; IRIS, 2018) para el del 9 de febrero de 1967, en esta región durante el transcurso de 2016 a 2018, la RSNC reportó para el municipio de Colombia, en el nororiente del departamento del Huila, varios sismos con $M_w > 4.5$ y profundidades focales ≤ 10 km (SGC, 2020). El 31 de octubre de 2016 ocurrieron dos sismos: el primero a las 19:20:00 hora local con M_w 5.3 y luego a las 21:05:58 hora local con M_w 4.8. El 6 de febrero de 2017 ocurrió otro sismo con M_w 5.4 y finalmente el 19 de julio de 2018, otro sismo con M_w 4.9. Para verificar la sismicidad reportada en esta región véase el Suplemento 1.

Para la región que abarca el SFA en el departamento del Meta, el 2 de julio de 2017 la RSNC (véase Suplemento 2) registró un sismo con M_w 4.7, que se localizó en el municipio de Lejanías, con una profundidad focal menor a 10 km (SGC, 2020); dos años y medio después, a unos 10 km al sur del municipio de Lejanías, en el municipio de Mesetas, se presentó el 24 de diciembre de 2019 a las 14:03:52 hora local un sismo con M_w 6.0,

cuya réplica principal de M_w 5.6 ocurrió 19 minutos después (Mayorga *et al.* 2020; USGS, 2020). En el proceso de réplicas de este último sismo, se destacaron 14 sismos con magnitudes $M_w > 4.0$, únicamente en los tres días posteriores al sismo. Pasado casi un mes, el 20 de enero de 2020, la RSNC había registrado 1663 eventos relacionados con el proceso de réplicas (véase el Suplemento 3).

Por su parte, el epicentro del sismo del 9 de febrero de 1967 con M_w 7.2 fue la localidad de Vegalarga en el municipio de Tello, departamento del Huila, de acuerdo con Ramírez (1975). La localidad de Vegalarga queda 50 km al sur del casco urbano del municipio de Colombia. Este es el único sismo histórico con localización epicentral que se ha presentado cerca de la región de estudio en este trabajo (Figura 1). El epicentro del sismo de Vegalarga se localizó instrumentalmente a 10 km aproximadamente al E de la Falla de Algeciras (IRIS, 2018), lo que podría asumirse como error de localización, dada la ausencia de estaciones sismológicas locales en esa época. Además del sismo de 1967, también han sido asignados al SFA los sismos del 16 de noviembre de 1827, cuyo epicentro Espinosa (2004), a partir de análisis macrosísmicos, ubicó en el municipio de Timaná, en el departamento del Huila, a unos 175 km al sur aproximadamente del epicentro instrumental del sismo de 1967, y el sismo del 31 de agosto de 1917, cuyo epicentro lo estableció de igual manera Sarabia *et al.* (2010) cerca al municipio de San Martín en el departamento del Meta, a 142 km aproximadamente al norte del epicentro del sismo de 1967.

Métodos

En la primera fase de este trabajo se hizo una correlación geológica regional a partir de la labor fotogeológica que verificó aspectos tectónicos como fallas en una escala 1:100.000; para esto, se hizo una búsqueda y revisión de imágenes tipo ALOS-PALSAR (2006-2011) (Figura 3) y LANDSAT 5, 7 y 8, con los servidores Alaska Satellite Facility - ASF (AFS, 2020) y EarthExplorer (USGS, 2020). También se usaron imágenes tipo Sentinel 1B con resolución de 10 m \times 10 m, tomadas del Copernicus Open Access Hub (ESA, 2020). Después de la revisión, se seleccionaron cuatro imágenes tipo LANDSAT 5, 7 y 8, escenas Path 8 Row 57 y Path 8 Row 58, con fechas: 1 de enero de 1988, 23 de marzo de 1988, 21 de febrero de 1998 y marzo 17 de 2018. Se escogieron estas imágenes por ser las que presentaron menos nubosidad. Todas las imágenes se procesaron con los programas ArcGIS 10.8 ArcMap

y ERDAS Imagine. Las imágenes ALOS-PALSAR correspondieron a diversos lapsos entre 2009 y 2010, y las imágenes Sentinel 1B correspondieron al 8 de julio de 2019 y el 1 de marzo de 2021. En esta labor se revisó información secundaria basada en la cartografía geológica regional realizada por el Servicio Geológico Colombiano a escala 1:500.000 y escala 1:100.000. Para la identificación de estructuras, fallas y lineamientos

con la labor fotogeológica se siguió a autores como Scanvic (1989), entre otros. Con esta labor y con apoyo de campo, igualmente, se realizó la búsqueda para el reconocimiento de los rasgos morfotectónicos e indicios de neotectónica; se siguieron los criterios de autores como Burbank y Anderson (2001), Bull (2007, 2009) y McCalpin (2009).

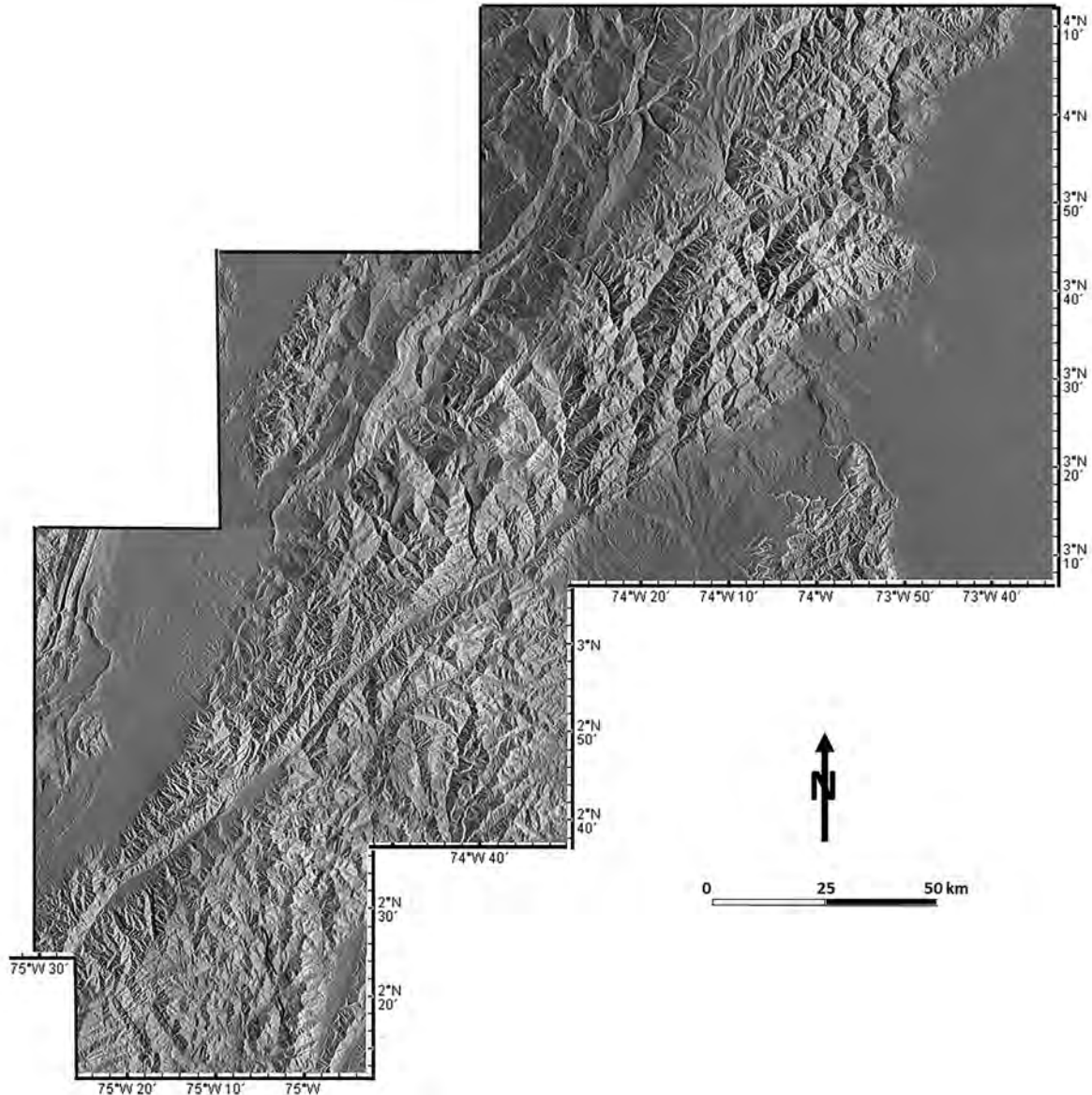


Figura 3. Mosaico de la región que abarca los sectores central y norte del Sistema de Fallas de Algeciras, construido desde un set de imágenes tipo ALOS-PALSAR (radar de apertura sintética en banda L) con resolución a 12,5 m correspondiente a los años 2010-2011.

Con respecto a la sismología, la información de la sismicidad instrumental fue tomada del registro de la RSNC para el lapso entre el 9 de febrero de 2012 y el 29 de febrero de 2020 (ver Material Suplementario 1, 2 y 3). Los focos son reportados por esta red con magnitud local (M_L) y M_w para aquellos casos cuya magnitud M_w superó 4.0. Su análisis se fundamentó en la metodología aplicada por Chicangana *et al.* (2012), que considera solo sismos con $M_L \geq 1.5$ seleccionados del catálogo de sismos de la RSNC (SGC, 2020). Esta magnitud se tuvo en consideración, debido a las limitaciones que tiene la RSNC en el número de estaciones para el área de este estudio. Los sismos con magnitudes $M_L > 1.5$ fueron registrados en cuatro o más estaciones de esta red; este es un criterio para indicar de manera aproximada su localización hipocentral.

De acuerdo con estos catálogos, los errores en la localización de los focos variaron un promedio de 3,158 km para la latitud, 3,377 km para la longitud y 6,875 km para la profundidad. Los sismos que varían en su magnitud local entre 1.5 y 2.5, lo cual, aún así, representa una gran incertidumbre en su localización por la gran distancia que hay entre las estaciones, de alguna u otra forma pueden ayudar a dar una interpretación aproximada sobre la actividad tectónica de las fallas que se presentan en la zona analizada. Por debajo de esta magnitud mínima, no se considera que el dato tenga fiabilidad para este cometido, lo cual sucede para la región de estudio, a pesar de no existir ruido antropogénico dada la localización de las estaciones, factor que da lugar a estimaciones erradas en las tasas de sismicidad de una región en el sentido de Kortström *et al.* (2016). En nuestro caso para un lapso corto, el cual no supera una decena de años, la red sismológica ha sufrido transformación al incrementar paulatinamente el número de estaciones y la forma de procesar sus datos, teniendo presente que cambió su software de adquisición y procesamiento, lo que arroja como resultado un catálogo para dos períodos.

Para el primer lapso, que corresponde a los sismos que van entre 2012 y el 28 de febrero de 2018, el catálogo se construyó con la ayuda de los softwares Earthworm y SEISAN. En el segundo lapso, que corresponde a los sismos ocurridos después del 1 de marzo de 2018, el catálogo se ha ido construyendo con el software SeisComp3 (SGC, 2020). La información del registro para antes del 1 de marzo de 2018 fue reprocesada por la RSNC, la cual seleccionó los sismos de magnitudes bajas con mejor calidad, dando como resultado un número de eventos muy bajo, con una ventana de tiempo inferior, que no superó los seis años; por esto,

esta información no sirve de soporte para un análisis de ciclo sísmico en el sentido de Scholz (2002, 2018), o con el método de los patrones de donas de Mogi o de quietud sísmica (Mogi, 1985) para un lapso previo a la ocurrencia de un sismo de gran magnitud. Sin embargo, esta información puede ser útil para observar la actividad tectónica a nivel regional en lapsos cortos, derivada de los sismos analizados aquí, y mostrar la actividad tectónica de una estructura mayor, como lo son, en este caso, las fallas Altamira y Nazareth al occidente o las fallas Algeciras, La Florida y otras para el SFA al oriente, en sus fases cosísmica y postsísmica (el estimativo del cese de réplicas).

Los eventos analizados en este trabajo son corticales con $h < 30$ km, ya que el objeto fue determinar la sismicidad en la litosfera que corresponde a la influencia de las fallas, y se basó en el registro instrumental de eventos con $1.5 < M_L < 6.0$ a partir lo observado en los catálogos de sismicidad, ajustados por la RSNC. El número total de sismos durante la ventana de tiempo para la zona de estudio fue de 1645 con $M_L > 1.5$. Esto indica que casi el 70% de los sismos correspondieron al segundo período del catálogo de la RSNC, es decir, desde el 1 de marzo de 2018 hasta el 29 febrero de 2020.

Para mejorar los futuros estudios sismotectónicos de estas zonas sismogénicas, se debe propender, como sugerencia técnica, por el despliegue de una red sismológica local con una alta densidad de estaciones. La solución hipocentral, debido a sus limitaciones y al despliegue de la RSNC, no sirve para diferenciar estructuras locales, y solo es efectiva en cierto grado cuando ocurren sismos con magnitudes $M_w \geq 4.8$, momento en que son registrados por más de una decena de estaciones; sin embargo, es imposible diferenciar una estructura de una dimensión menor a 10 km de longitud, debido a los valores de error en la localización de los focos. Se destaca que el catálogo de sismos de la RSNC (SGC, 2020) ha ajustado los sismos en su Catálogo de Sismos Integrado (CSI), de tal manera que el Gap es menor a 180° y el tiempo de viaje residual de la raíz cuadrada media (RMS) es menor a 1; esto da una muy buena confiabilidad para la localización y profundidad del sismo, a pesar de las limitaciones ya indicadas.

La RSNC ha seguido un modelo de campo de velocidades que fue calculado y ajustado inicialmente por Ojeda y Havskov (2001), el cual fue estandarizado para el territorio colombiano mediante el uso del programa SEISAN de Havskov y Ottemoller (1999). El modelo de velocidades unidimensional para V_p y

Vs generalizado para Colombia consta de cinco capas planas y un semiespacio (Figura 4). En la recopilación de los mecanismos focales se tomó información del catálogo del proyecto Global Centroid-Moment-

Tensor (CMT) de Ekström *et al.* (2012) y del catálogo de la RSNC que aplica soluciones calculadas por los métodos SWIFT, SCMTV y Fase W (SGC, 2020).

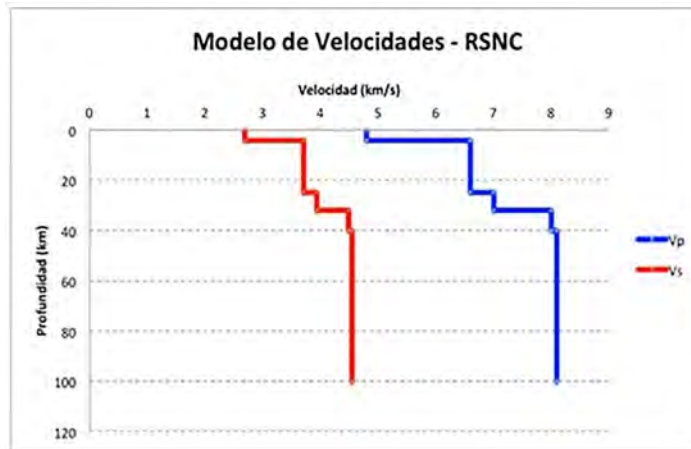


Figura 4. Modelo de velocidades establecido para el territorio colombiano, aplicado por la Red Sismológica Nacional de Colombia. Modificado de Ojeda y Havskov (2001).

Resultados

Colombia, Huila

Aspectos tectónicos. La región que corresponde al municipio de Colombia (Huila) presenta, según la cartografía geológica realizada por Fuquen y Osorno (2002), una alta complejidad geológica tanto desde el punto de vista estratigráfico como estructural. De acuerdo con esta, existen unas fallas de carácter inverso (¿Falla San Miguel?) que tienen un rumbo que varía de NE a E - O, y finalmente a NO, y de las cuales no aparecen indicios en campo. Estas fallas, según la cartografía de estos autores, cortan y desplazan hacia el oeste al sector norte del Sinclinal de Colombia. Con estas fallas no es posible explicar en qué momento aparecen y producen la ruptura del sinclinal y cuando lo desplazan; esto se afirma porque las unidades plegadas pertenecen a la Formación Honda y tienen edad Mioceno medio, lo cual es muy corto en tiempo geológico para indicar la reorganización estructural que se muestra en la plancha 303.

La secuencia lógica es un régimen extensional que da origen al fallamiento normal, para pasar luego a una inversión tectónica resultante de un acortamiento cortical que simultáneamente genera el plegamiento de las unidades Paleógenas y de la Formación Honda que aquí está representada por la Formación Arcillolitas de Colombia (Fuquen y Osorno, 2002). Dada esta reflexión, entonces, con una revisión a escala regional de imágenes tipo ALOS-PALSAR (Figura 3), se observan fallas con rumbo NO - SE, de las cuales se destaca la Falla Ambicá

(Figura 5), la cual corta de manera oblicua el Sinclinal de Colombia, pero no lo desplaza. Estas fallas al parecer derivan de los esfuerzos entre los bloques rocosos del basamento que ofrecen diferentes grados de resistencia al desplazamiento del material plástico, representado por las secuencias sedimentarias Paleo-Neógenas durante el acortamiento cortical que generó la inversión tectónica en este sector de los Andes colombianos desde el Mioceno superior.

El modelo estructural regional del valle alto del Magdalena, en donde se enmarca la región de Colombia, representa una cuenca retroarco en el sentido de Butler y Schamel (1988), y que luego confirma DeCelles (2012). Radic (2004) muestra con su interpretación de una sección de línea sísmica regional, la cual sigue una dirección NO - SE, un predominio de fallas en estructuras en flor con rumbo NE y vergencia al oeste, que afectaron a las unidades plegadas Cretácico - Paleógenas. La cartografía de Fuquen y Osorno (2002) indica un contacto fallado entre las unidades del Mioceno con las suprayacentes del lapso Cretácico-Paleógeno, pero Radic (2004) no muestra contacto fallado entre estas secuencias.

Con el apoyo de la observación de imágenes tipo LANDSAT 8, ALOS-PALSAR y SENTINEL 1B (Figura 5), el flanco occidental de la Cordillera Oriental en esta región es un escenario predominantemente compresional al suroriente de la cabecera municipal de Colombia, aguas arriba del río Ambicá. En este se observa una

geomorfología que revela la presencia de fallas que se expresan en las imágenes como surcos que cruzan el paisaje con rumbo NE. Los rasgos morfotectónicos se asocian a estas fallas, las cuales, comparando este escenario orogénico con lo que exhiben autores como Bull (2007, 2009) y McCalpin (2009), con sus ejemplos en otros lugares del mundo, confirman la presencia de fallas inversas con buzamiento hacia el SE.

En esta zona se destacan escarpes de falla con una geomorfología gobernada más por la tectónica que por la erosión (Figura 6). De acuerdo con la cartografía geológica, las fallas Altamira y Nazareth son fallas inversas. Estas fallas están indicadas por la cartografía geológica local por Fuquen y Osorno (2002), pero otros autores del SGC no las indican hacia el NE de la plancha 303, y esto ocurre con las planchas 283 Purificación (Cossio *et al.*, 1994), 284 Santana (Patiño *et al.*, 2015b) y 304 La Uribe (Patiño *et al.*, 2015a), sin embargo, el mapa geológico de Colombia (Gómez *et al.*, 2015; Gómez y Montes, 2021) sí las indica regionalmente

hacia el norte, al igual que los autores de la plancha 265 Icononzo (Caicedo *et al.*, 2002). En la revisión de la cartografía geológica a escala 1:100.000 se encontraron en el empalme de esta información entre las planchas vecinas, muchas incongruencias tanto estratigráficas como de geología estructural. Hacia el oriente de la Falla Altamira y paralelas a esta están respectivamente las fallas Papaneme y Ucrania, las cuales, según la cartografía geológica del SGC son, inversa la primera y dextral la segunda (Figuras 2 y 5). La Falla Ambicá que sigue el curso del río del mismo nombre en dirección noroeste es de tipo normal, lo cual se constata por la presencia de facetas triangulares como expresión morfotectónica destacada relacionada con su plano de la falla, indicando que el bloque colgante es al norte de esta falla (Figura 7). La Falla San Marcos, en la que además en visita de campo se observó una estría de falla en uno de sus planos en un afloramiento de la Formación Arcillolitas del Río Cabrera, indica que es una falla transcurrente dextral por lo que desmiente que sea inversa tal como lo señalan Fuquen y Osorno (2002).

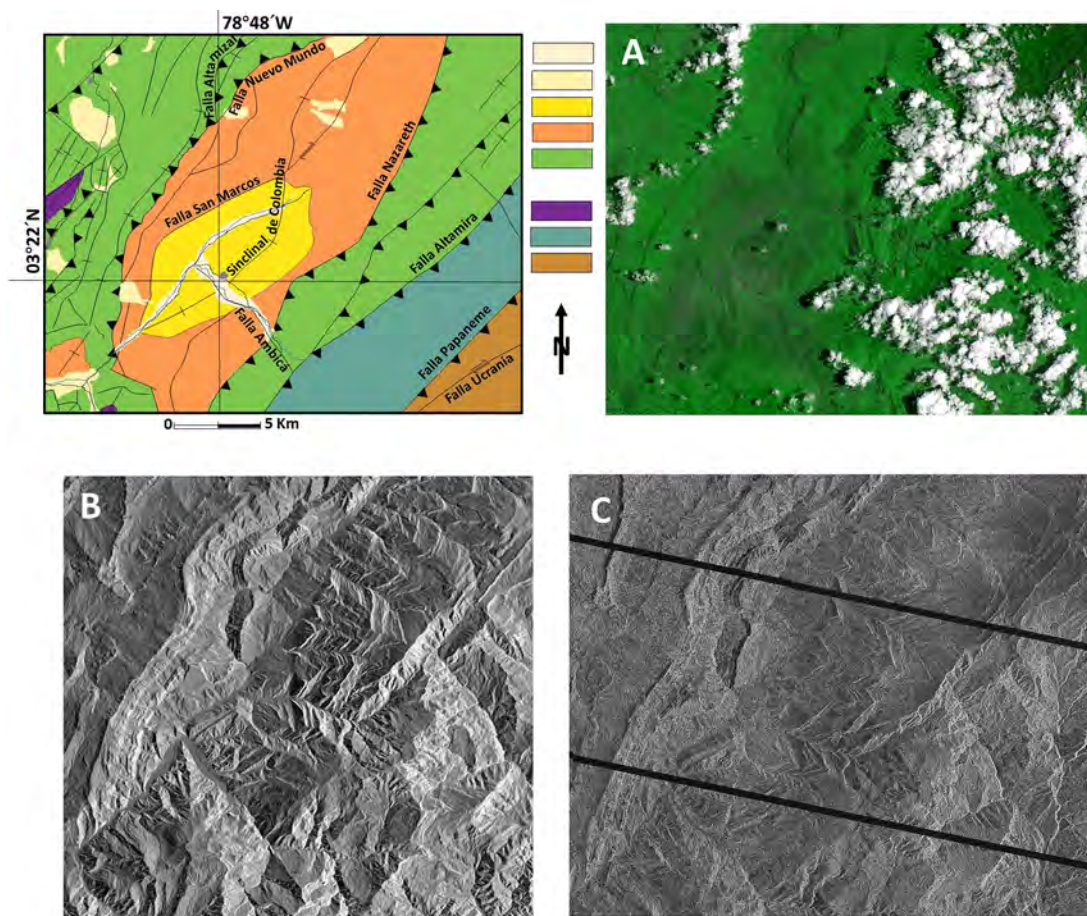


Figura 5. Teniendo como guía el mapa geológico (véase la Figura 2), con el fin de recalcar aspectos estructurales para la región del municipio de Colombia, en el departamento del Huila, se usan tres tipos de imágenes de satélite: **A.** Imagen tipo LANDSAT 8, en combinación de bandas 7, 4, 2 con banda 8. **B.** Imagen tipo ALOS - PALSAR. **C.** Imagen tipo Sentinel 1B.

En trabajo de campo, el cual se realizó siete meses después de la ocurrencia de los sismos del 31 de octubre de 2016, se encontraron como efectos de sitio causados por los sismos, grietas, hundimientos en terreno y varios procesos de remoción de masa. Se destaca finalmente que las rocas aflorantes (formaciones

Arcillolitas de Colombia, Arcillolitas del Río Cabrera y Une) presentan un avanzado grado de meteorización, y en algunos lugares las rocas de la Formación Une presentan cataclasis. De acuerdo con la interpretación de la imagen ALOS - PALSAR el mapa tectónico se puede ver en la Figura 8.

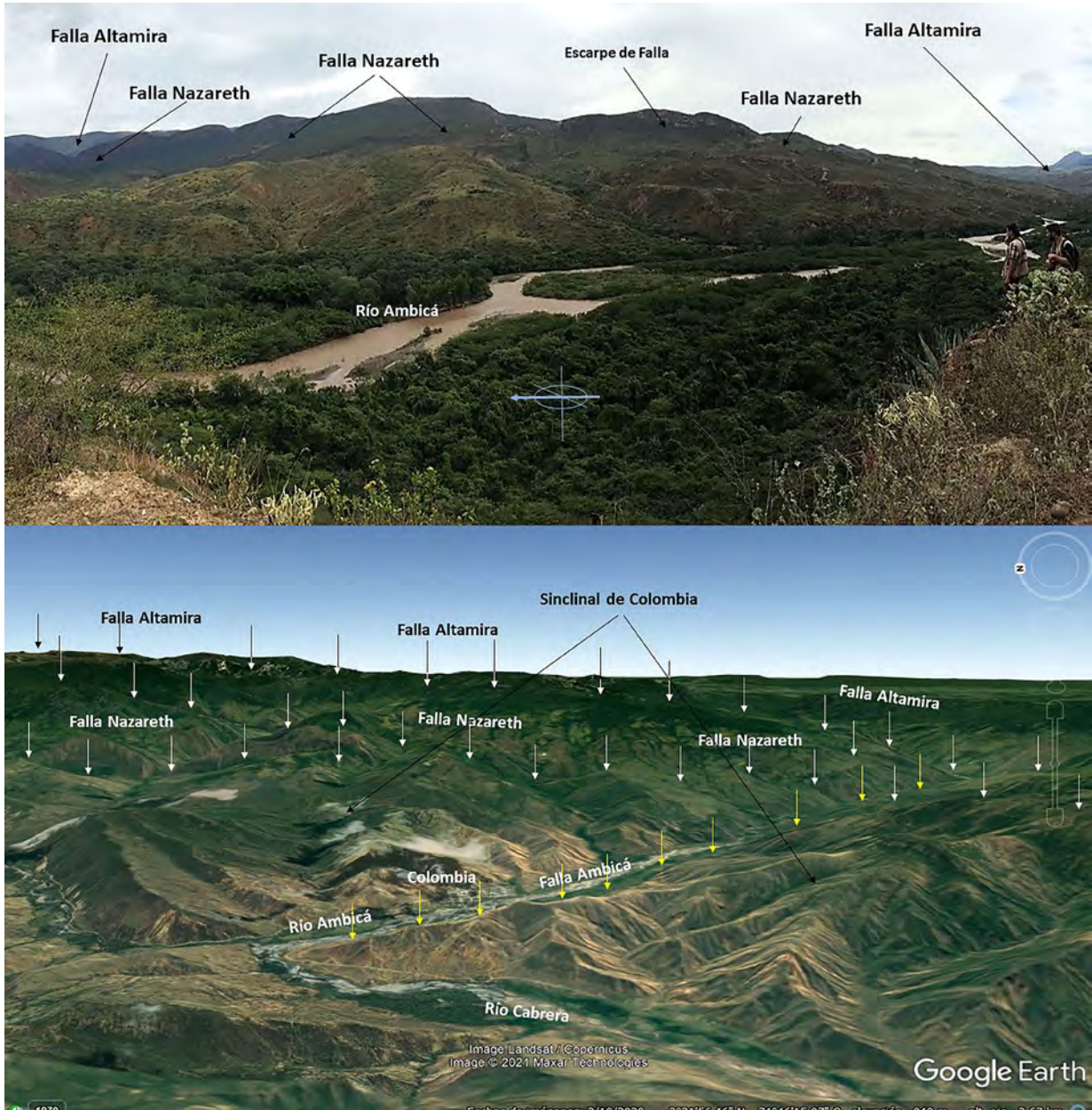


Figura 6. A. Panorámica de la región del municipio de Colombia, departamento de Huila, al oriente de la cabecera municipal aguas arriba del río Ambicá, mostrando la ubicación de las fallas Altamira y Nazareth. **B.** Con imagen 3D Google Earth©, las flechas indican de manera aproximada los trazos de las fallas. En este sector se resaltan algunos rasgos morfotectónicos relacionados con tectónica compresiva.



Figura 7. Dos aspectos del paisaje en el municipio de Colombia, departamento de Huila, en límites con el departamento del Tolima y en el entorno de su cabecera municipal. **A.** Cabecera municipal en la margen derecha del río Ambicá y parte del Sinclinal de Colombia. **B.** El escarpe de la Falla Ambicá se observa en la margen izquierda del río Ambicá, el cual está definido por facetas triangulares. Desde los aspectos morfotectónicos se observa aquí un escenario tectónico extensivo que posiblemente está gobernado por el movimiento lateral derecho de la Falla San Marcos que presenta rumbo oblicuo a la Falla Ambicá (véase la Figura 5).

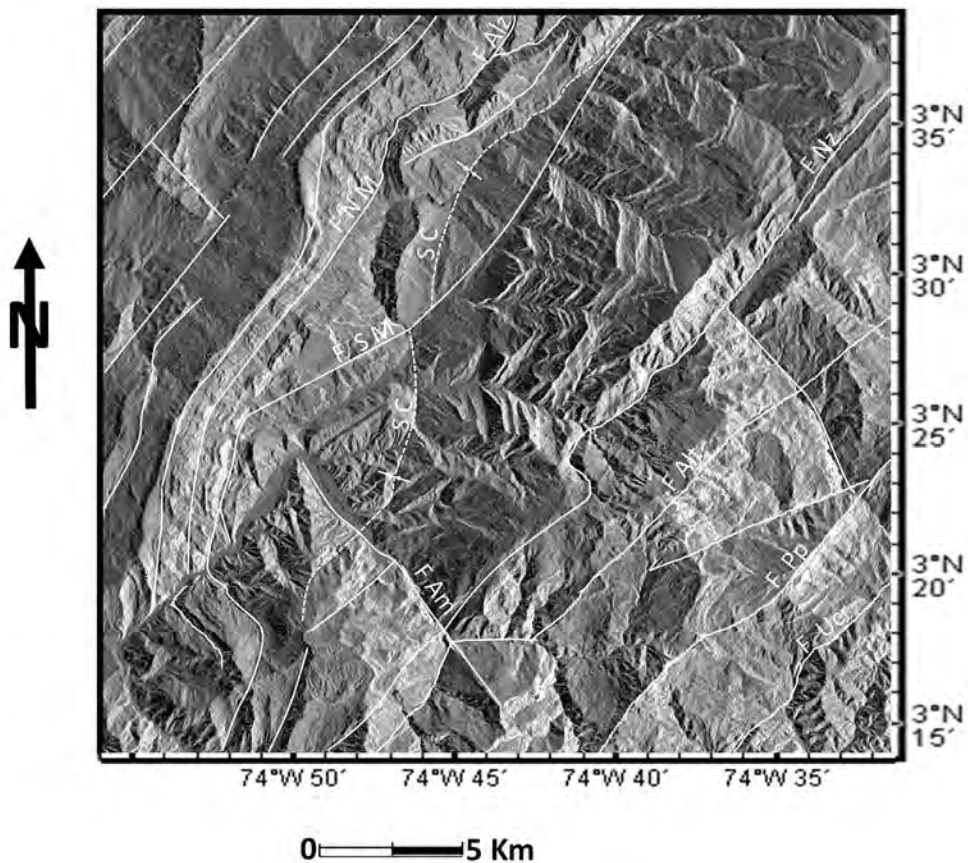


Figura 8. Imagen radar ALOS-PALSAR ALPSRP180600050-L1.5 del 15 de junio de 2009 en la cual se muestran los principales elementos estructurales de la región del municipio de Colombia en el departamento del Huila. FAM: Falla Ambicá, FALT: Falla Altamira; FPP: Falla Papaneme, FNM: Falla Nuevo Mundo, FNz: Falla Nazareth, FSM: Falla San Marcos, FUCr: Falla Ucrania, SC: Sinclinal de Colombia.

Aspectos sismológicos. Los sismos registrados por la RSNC en este municipio fueron un total de 84 entre el 25 de febrero de 2013 y el 18 de enero de 2020 (véase Suplemento 1). En este trabajo se encontró que los sismos con magnitud $M_w > 4.0$ se relacionaron con las fallas Altamira y Nazareth, mientras que los sismos con $M_w \leq 4.0$ se relacionaron con la Falla Ambicá (véase Suplemento 1). Los mecanismos focales dados para los sismos de mayor magnitud dieron componente inverso (Figura 9). Para esta región no hay información de sismos históricos preinstrumentales ocurridos entre el siglo XVIII y principios del siglo XX. Finalmente, en enero 23 de 2021, a las 16:12 hora local, se presentó un sismo superficial con $h < 30$ km y M_w 5.0. Este evento fue localizado por la RSNC a unos 32 km al suroeste de la cabecera municipal de Colombia, y de acuerdo con esta fuente de información su mecanismo focal fue inverso (SGC, 2021). La localización de sus coordenadas indicó que su epicentro se ubicó en el ámbito de la Falla Altamira.

Piedemonte Llanero, Meta

Aspectos tectónicos. En la información geológica publicada por el Servicio Geológico Colombiano para piedemonte llanero, correspondiente al departamento del Meta entre la zona adyacente a la Sierra de La Macarena y la divisoria de aguas de la Cordillera Oriental en su flanco oriental, se muestra en esta región un predominio de fallas inversas y transcurrentes (Aránzazu *et al.*, 2015a, 2015b; Patiño *et al.*, 2015a, 2015b). Con verificación de campo y con la ayuda de imágenes de satélite, en algunos sectores se muestra que la geomorfología está influenciada por la actividad tectónica. Las geformas predominantes indican que el paisaje en general está gobernado más por la tectónica que por la erosión. Con los criterios de Bull (2007, 2009) y McCalpin (2009), las geformas predominantes se ajustan a los indicios morfotectónicos de fallas inversas y transcurrentes. Se destacan, principalmente, cañones alineados hasta por encima de una decena

de kilómetros, los cuales están relacionados con los planos de falla, que a nivel regional se verifican con las imágenes tipo LANDSAT 8 y ALOS - PALSAR (Figuras 10 y 11). A pesar de las tasas altas de denudación que se presentan en esta región debido a que la pluviosidad anual varía entre 4000 y 5000

mm al año (IDEAM, 2005), esta geomorfología se mantiene y hacia los bordes del sistema montañoso, en la llanura adyacente, el levantamiento de terrazas en algunos ríos y el basculamiento del terreno indican la actividad reciente de algunas de las fallas relacionadas al SFA (Figura 11).

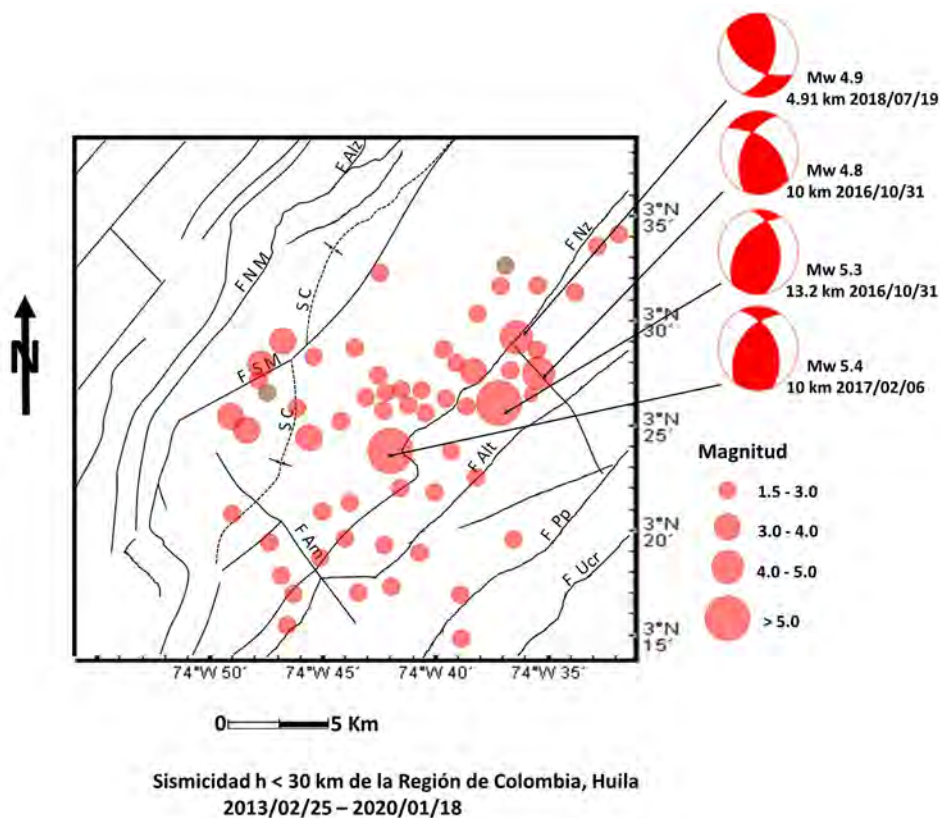


Figura 9. Mapa de sismicidad correspondiente a la región del municipio de Colombia en el departamento del Huila para el lapso 2013-2020. Los mecanismos focales son tomados del proyecto global CMT (Ekström *et al.*, 2012).

Es de anotar que en esta región predominan afloramientos compuestos por rocas sedimentarias y metamórficas correspondientes al lapso Neoproterozoico - Paleozoico inferior tanto en el borde de la cordillera como en la Sierra de la Macarena (Aránzazu *et al.*, 2015c; Chicangana *et al.*, 2020). En el sector oriental de la cordillera, estas litologías están encajadas entre las fallas regionales con rumbo NE. La geología y la estratigrafía en esta región muestran un basamento controlado estructuralmente por el SFA, y otras fallas regionales como la Falla Altamira al oeste, las cuales son paralelas con rumbo NE. Para indicar que las estructuras morfotectónicas están asociadas a las fallas en diversas escalas de observación, ya sea a nivel de campo o por verificación regional desde las imágenes satelitales, se hizo constatación desde la literatura igualmente con autores como Bull (2007, 2009) y McCalpin (2009), y se trató de realizar una

estimación en el sentido escala tiempo siguiendo a Burbank y Anderson (2001), para de esta manera indicar el alcance de su amenaza sísmica, conforme los elementos de geomorfología tectónica verificados con las imágenes. Sin embargo, esto último es algo que todavía presenta gran incertidumbre, porque dadas las condiciones climáticas de esta región, junto con la naturaleza de sus afloramientos en los cuales predominan rocas duras y cristalinas, se torna difícil o imposible recoger información en el campo para realizar estudios cuantitativos relacionados con morfometría o microtectónica.

En la zona montañosa igualmente es imposible que se presenten depósitos sedimentarios favorables que permitan cuantificar el movimiento de las fallas con propósitos de paleosismología en zonas adyacentes

o dentro de los corredores de falla, debido a que se trata de valles estrechos cubiertos por bosques densos relacionados con bosque húmedo tropical, en donde los escasos afloramientos rocosos están fuertemente meteorizados y cubiertos por vegetación y, sedimentos esporádicos asociados a procesos de remoción de masa dada la alta pendiente de sus laderas (véanse Figuras 12A y 12B).

Con la ayuda de imágenes tipo ALOS-PALSAR y LANDSAT, se encontraron rasgos morfotectónicos relacionados con la presencia de fallas como drenajes controlados por la Falla Algeciras con desplazamientos que en promedio varían de 400 hasta más de 1700 m, en zonas en donde cortan los cauces. Estos desplazamientos se observan en la quebrada la Cristalina, el río La Cal y el río Cumaral en el municipio de El Dorado, por la Falla Río Tonoa en el río de su mismo nombre en el municipio de El Dorado, en la quebrada El Diamante y el río Duda en el municipio de La Uribe y en los ríos Cafre y Lucía en el municipio de Mesetas. También se evidenciaron drenajes controlados por la Falla Algeciras siguiendo el rumbo de la falla como los ríos Guape y Guejar en el municipio de Lejanías, y por la Falla La Florida que afecta el caño Urichare y los ríos Guape y Guejar en el municipio de Lejanías.

En el sector de la mina de caliza en el municipio de El Dorado se observan escarpes de falla relacionados con la Falla Algeciras. La Falla Río Tonoa controla además el río Ariari entre los municipios de Cubarral y El Dorado. En visita de campo se constataron algunos rasgos geomorfológicos como escarpes de falla y valles en V para la Falla Río Tonoa. Estos escarpes varían en altura desde varios m hasta varias decenas de m, aunque en muchos casos dada la alta densidad de la vegetación por los bosques que cubren sus laderas, estos son difíciles de determinar. Es común en campo no poder observar el contacto de la falla, ya que este se encontraba cubierto por sedimentos, resultado de procesos de remoción de masa antiguos cuando ya están completamente cubiertos de vegetación y parcialmente erodados, y más recientes cuando estos están parcialmente cubiertos por la vegetación. En la falla del Río Tonoa se constató un plano de falla con estrías en areniscas de la Formación Guape - Duda que indica un movimiento dextral; en esta falla es común ver rocas con cataclisis en su área de influencia (Figura 12C, 12D, 12E y 12F). Para la Falla La Florida también se observaron cauces truncados y escalonados, especialmente en los municipios de La Uribe y Lejanías.

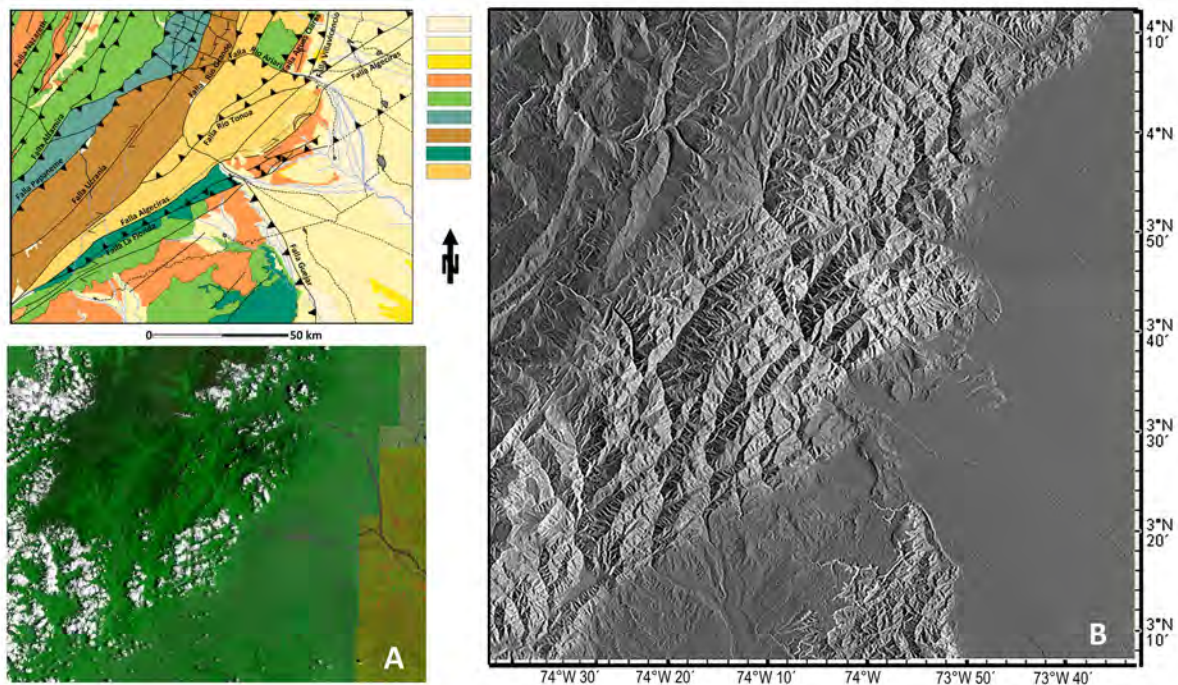


Figura 10. Teniendo como guía el mapa geológico (véase la Figura 2), con el fin de recalcar aspectos estructurales para la región del piedemonte llanero en el departamento del Meta, se usan dos tipos de imágenes de satélite. **A.** Imagen tipo LANDSAT 8 en mosaico de las imágenes Path Roll 7-57, 7-58, 8-57 y 8-58, en combinación de bandas 6, 5, 2. **B.** Imagen tipo ALOS-PALSAR.

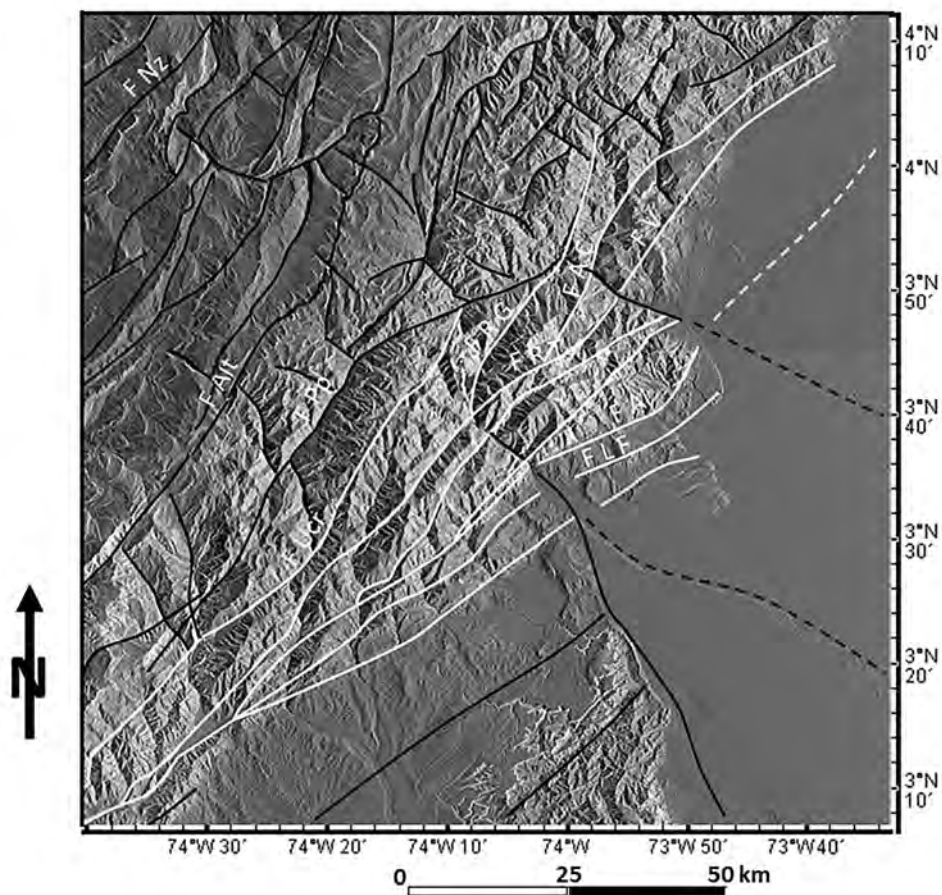


Figura 11. Mapa tectónico de la región que corresponde al piedemonte llanero a partir de un mosaico de imágenes radar tipo ALOS-PALSAR. En este se indican las fallas asociadas al Sistema de Fallas de Algeciras en trazo blanco de otras fallas regionales que conforman este sector de la Cordillera Oriental. FAI: Falla Algeciras; FAC: Falla Aguas Claras; FAlt: Falla Altamira; FLF: Falla La Florida; FRG: Falla Río Grande; FRT: Falla Río Tonoa; FUcr: Falla Ucrania; FV: Falla Villavicencio.

Sismicidad. La sismicidad del piedemonte llanero (véase Suplementos 2 y 3), entre el 9 de febrero de 2012 y el 29 de febrero de 2020 (Figura 13), muestra que en el área municipal de Castilla La Nueva se presentó un sismo el 24 de julio de 2017 con Mw 4.0, el cual se ubicó al oeste del trazo inferido de la Falla Algeciras. Hacia el sur, en Lejanías, los sismos de mayor magnitud fueron de Mw 4.3 para el 15 de febrero de 2012, que se relacionó con la Falla Algeciras, y de Mw 4.7 para el 2 de julio de 2017, que se relacionó con la Falla La Florida. En el área municipal de La Uribe se presentaron dos sismos con magnitudes mayores a

4.0: uno, el 9 de febrero de 2012 con Mw 4.0 y el otro, el 12 de mayo de 2015 con Mw 4.2. Estos sismos se relacionaron por su ubicación con la Falla Algeciras. En los municipios de El Dorado y San Juan de Arama solo se presentó un sismo y para el municipio de Cubarral, dos sismos. El de El Dorado con Mw 3.5 se relacionó con la Falla Algeciras, y los de Cubarral, uno con Mw 3.3 se relacionó con la Falla Aguas Claras y el otro con Mw 3.1, con la Falla Pepéneme. Finalmente, en San Juan de Arama se presentó un pequeño sismo con Mw 2.5, que se ubicó al oeste de la Falla La Florida.



Figura 12. Varios aspectos de indicios de geomorfología tectónica reciente en el piedemonte llanero, en los municipios de El Dorado y Lejanías, departamento de Meta. En A y B, en el municipio de El Dorado, la línea a trazos indica la ubicación de la Falla Río Tonoa y aspecto de sus escarpes de falla. En ambos casos el escarpe se presenta en rocas de la Formación Guape - Duda, las cuales están muy meteorizadas y están cubiertas por vegetación. En C y D, entorno de la Falla Río Tonoa, en el municipio de El Dorado. En C, indicador cinemático indicado por estrías de falla en areniscas pertenecientes a la Formación Guape - Duda, y en D, plano de falla afectando areniscas de la Formación Guape - Duda. La flecha indica el martillo para escala. En E y F, Falla Río Tonoa, en el municipio de Cubarral. E, brecha de falla, y F, cataclasis en areniscas de la Formación Areniscas del Limbo. En G y H, aspectos morfotectónicos de la Falla La Florida en el municipio de Lejanías. En G al fondo, se indica el sector por donde discurre la Falla Algeciras.

En la región que corresponde al municipio de Mesetas, se hace aquí una separación de tiempo en consideración de los cambios que presentó el catálogo de la RSN, dado que en este municipio se presentó el sismo de 2019, el cual en su proceso de réplicas abarcó el 80,84% de los eventos registrados en un lapso de 35 días. Entonces, entre el 7 de octubre de 2013 y el 28 de febrero de 2018, solo se presentaron dos sismos: el del 7 de octubre de 2013 con Mw 3.1, que se localizó en el ámbito de la Falla Algeciras y el del 23 de diciembre

del mismo año con Mw 3.5, que se localizó en el ámbito de la Falla La Florida. Para el lapso entre el 1 de mayo de 2018 y el 24 de diciembre de 2019, y que correspondió a 20 meses antes del sismo con Mw 6.0, se presentaron 29 sismos con $M_L \leq 2.9$, dispersos por el área municipal. A partir del 24 de diciembre con la ocurrencia del sismo de Mw 6.0 hasta el 29 de febrero de 2020 ocurrieron en el territorio de Mesetas 963 sismos con $M_w > 1.5$, de estos 944 corresponden a réplicas del sismo de Mw 6.0 que ocurrió el 24 de

desde el punto de vista teórico lo indicado por autores como Wells y Coppersmith (1994), Scholz (2002, 2018) y Hanks y Bakun (2014), entre otros, para terremotos pequeños o de magnitud $M \geq 6.0$; sin embargo, estos resultados con errores de localización tanto en sentido vertical como horizontal, estimados en un promedio de 4 km de acuerdo con el catálogo de la RSNC, hace difícil determinar con precisión

cuál fue el plano de falla en que se inició la ruptura. Los mecanismos focales reportados por la RSNC del sismo principal, la réplica principal y algunas de las réplicas con $M_w \geq 4.0$ muestran en todos los casos una falla transcurrente, lo cual, sumado a la localización epicentral, permite estimar que la Falla Algeciras es la fuente sismogénica del sismo del 19 de diciembre de 2019.

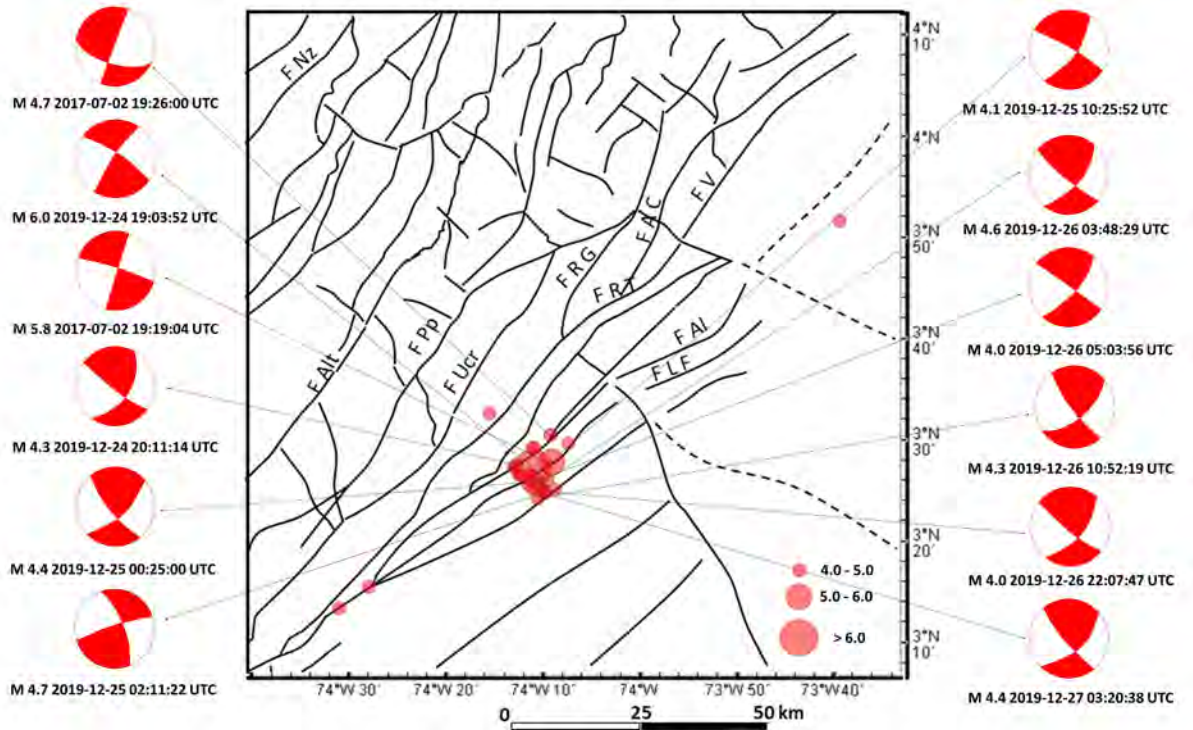


Figura 14. Mapa de sismicidad correspondiente a la región del piedemonte llanero al suroeste del departamento del Meta con $M_w \geq 4.0$, para el lapso entre el 19 de diciembre de 2012 a las 19:03:52 UTC y el 27 de diciembre de 2012 a las 03:20:38 UTC. En esta figura se muestran los mecanismos focales tomados de la RSNC (SGC, 2020) del sismo principal y de algunas de sus réplicas.

Discusión

En este trabajo se han encontrado dos regiones para el sector meridional de la Cordillera Oriental entre los 3° y $4^\circ N$ con actividad sísmica relevante en los últimos 10 años. Una es la región del municipio de Colombia, en el departamento del Huila, en donde la sismicidad superficial obedece a un sistema de fallas diferente del Sistema de Fallas de Algeciras en el sentido indicado por Velandia *et al.* (2005) y otros; la otra corresponde a un sector de este sistema de fallas en el piedemonte llanero, en el departamento de Meta. Los sismos del municipio de Colombia se concentran principalmente en fallas como la Falla Altamira y la Falla Nazareth. Esto se menciona porque la mayoría de los trabajos previos han afirmado que toda la sismicidad de este sector de la Cordillera Oriental se relaciona

exclusivamente con el Sistema de Fallas de Algeciras, sin tener presente que la Falla Altamira es diferente a las fallas del SFA, y al menos a una latitud de $3^\circ N$ en donde la separación entre la Falla Altamira y el SFA es mayor a 30 km en sentido E - O.

De acuerdo con la cartografía geológica, la Falla Altamira se separa de la Falla Algeciras y sale como un ramal de esta hacia el norte a los $2^\circ 41' N$ en la cuenca de Balsillas a 80 km al suroeste del municipio de Colombia. La Falla Altamira es una falla inversa con buzamiento hacia el SE, y con respecto a su actividad tectónica reciente o neotectónica, solo se reportan indicios en este sentido para el sector de la cuenca de Balsillas por Cristancho y Ojeda (2015). La Falla Altamira ha sido considerada como parte del SFA por muchos autores desde la década de 1990, por ejemplo,

Fuquen y Osorno (2002) y Velandia *et al.* (2005), entre otros, e inclusive la siguen considerando de esta manera Diederix *et al.* (2020). A la Falla Altamira no se la ha considerado como una falla generadora de sismos, ni fue considerada por el Servicio Geológico Colombiano cuando se realizó el Estudio de Amenaza Sísmica de Colombia (AIS-UNIANDES-INGEOMINAS, 1996); tampoco París *et al.* (2000) la incluyen en su inventario. Aquí se indica que la Falla Altamira es una falla inversa que al sur limita con unidades de basamento como rocas del Complejo Garzón con edad Mesoproterozoico y del Batolito de Algeciras (Cuarzomonzonita de Algeciras) de edad Jurásico, y hacia el sector norte sirve de contacto entre rocas Meso-Cenozoicas al oeste con rocas de edad Paleozoico al E. Por su parte, la Falla Algeciras que es transcurrente dextral, y considerada única por París *et al.* (2000), quienes le asignaron una longitud de 156,5 km, solo sirve de contacto hacia el sur de la cuenca de Balsillas entre el batolito Jurásico y rocas del Complejo Garzón. A partir de la cuenca de Balsillas y hacia el norte, solo corta rocas del Complejo de Garzón.

En esta investigación, tras verificar la Falla Algeciras desde una escala regional con el soporte de imágenes satelitales, se encontró que se trunca a los 3°06'N (Figura 15), y, aproximadamente a 14,5 km al noreste de sitio donde se trunca la Falla Algeciras, aparece el extremo sur de la Falla Algeciras Sur, nombrada así por autores como Aránzazu *et al.* (2015a, 2015b) y Patiño *et al.* (2015b), entre otros. A esta última falla, previamente París *et al.* (2000) la denominaron Falla Guayuriba. Entonces, la Falla Algeciras en su descripción tradicional, ha sido considerada como una larga falla continua, pero el SFA es un sistema de fallas transcurrentes segmentado, tal como lo han mostrado en la literatura autores como de Joussineau y Aydin (2009), entre otros. Sin embargo, para otros autores, fuera de los tradicionales como Velandia *et al.* (2005), persiste a la fecha (2021) la posición de considerarla continua y no segmentada, por ejemplo, Diederix *et al.* (2020), Mayorga *et al.* (2020) y Noriega-Londoño *et al.* (2021), entre otros, quienes de manera forzada dan continuidad a la Falla Algeciras hacia el norte en dirección NE, e ignoran el truncamiento del segmento indicado aquí y que previamente París *et al.* (2000) habían indicado. Inclusive, los responsables de la cartografía geológica local a escala 1:100.000 del SGC como Ramos *et al.* (2015) plantean lo mismo, y, además, indican de manera forzada que hacia el norte la Falla Ucrania se genera como ramal de la Falla Algeciras, la cual efectivamente tiene su extremo sur a 7 km al NO del truncamiento de la Falla Algeciras.

Lo anterior indica que no ha existido un control preciso de la extensión de las fallas en esta región del país por parte de la cartografía geológica oficial; además, dada las condiciones de inaccesibilidad para realizar un óptimo control de campo por la gran extensión de esta región en la cual predominan selvas y bosques muy densos, con un clima tropical amazónico, surgen imprecisiones de orden estratigráfico. El indicar que una falla transcurrente es continua por centenares de km sin realizar un análisis tectónico y morfotectónico detallado a escalas pequeñas (\leq a 1:25.000) implica indicar de manera errónea el alcance de su potencial sismogénico.

En los trabajos de campo realizados a las zonas de falla del SFA en el departamento del Meta, en la zona montañosa, no fue posible encontrar evidencias de tectónica activa con indicios como marcadores cinemáticos, o contar con cuencas sedimentarias recientes que sirvan para realizar futuros estudios de paleosismicidad. De acuerdo con lo encontrado, se deben diferenciar las fallas y no unificar como un solo trazo de falla continuo de centenares de km de longitud a la Falla Algeciras. Asumir eso implica no avanzar en el conocimiento no solo de su potencial sismogénico, sino del de las fallas adyacentes. En esta región además es común encontrar rocas con cataclasis y milonitas. Efectivamente, se relacionan con fallas, pero no indican si en realidad estas fallas son sismoactivas en algunos sectores o planos. aseverar lo contrario es especular. La morfotectónica indica actividad tectónica reciente, pero depende de cómo se aplique la escala en este sentido. En el piedemonte llanero se observan rasgos de morfotectónica de grandes dimensiones con el uso de imágenes de satélite desde luz visible como LANDSAT o radar como ALOS-PALSAR o SENTINEL 1B, pero eso solo indica, para un paisaje regional de varias decenas de km de extensión, un ambiente de tectónica activa y crecimiento orogénico, pero no muestra el potencial sismogénico de una falla en particular.

Desde la sismología también existe incertidumbre sobre esta región, debido a que la localización dada por la RSNC no da exactitud sobre la estructura que generó un sismo dado, sin embargo, las soluciones de los mecanismos focales tanto para los sismos de Colombia en el departamento del Huila como para el sismo de Mesetas de diciembre 24 de 2019 hacen inferir qué tipo de falla lo generó.

Respecto a los sismos de la región de Colombia, como se anotó antes, un sismo con magnitud Mw 4.8 se presentó a 30 km al SO de Colombia a principios

de 2021, en el municipio de Baraya, y este tuvo una relación con la Falla Altamira tanto por su localización como por la similitud de su mecanismo focal. Sin embargo, con otros sismos como el del 9 de febrero de 1967, el cual fue registrado por las estaciones de la red global (IRIS, 2018), su porcentaje de certeza con respecto a la localización epicentral y la profundidad de su foco fue demasiado incierto, ya que en esa época había muy pocos sismógrafos en Colombia, los cuales pertenecían al Instituto Geofísico de los Andes de la Universidad Javeriana (Ramírez, 1975). Se asumió que la falla causante de este sismo fue la Falla Algeciras por autores como París *et al.* (2000), Velandia *et al.* (2005), entre otros. El criterio fue por su respuesta macrosísmica y por aspectos morfotectónicos de la falla cerca de su epicentro instrumental.

Se insiste en que la falta de una alta densidad de sismógrafos que ayude a visualizar la microsismicidad de estas fallas impide conocer el potencial sismogénico de estas, y el aumento de la densidad de estaciones sismológicas, junto con redes de estaciones geodésicas, ayudará de cierta manera a realizar estudios más certeros con respecto a la determinación del potencial sismogénico; mientras tanto, no es posible aseverar que la Falla Algeciras se “reactivó” con el sismo de Mesetas, Meta, del 24 de diciembre de 2019, después de transcurridos más de 52 años desde el sismo del 9 de febrero de 1967. Esto no puede ser posible luego de ver que esta falla no es continua, y por el contrario es segmentada.

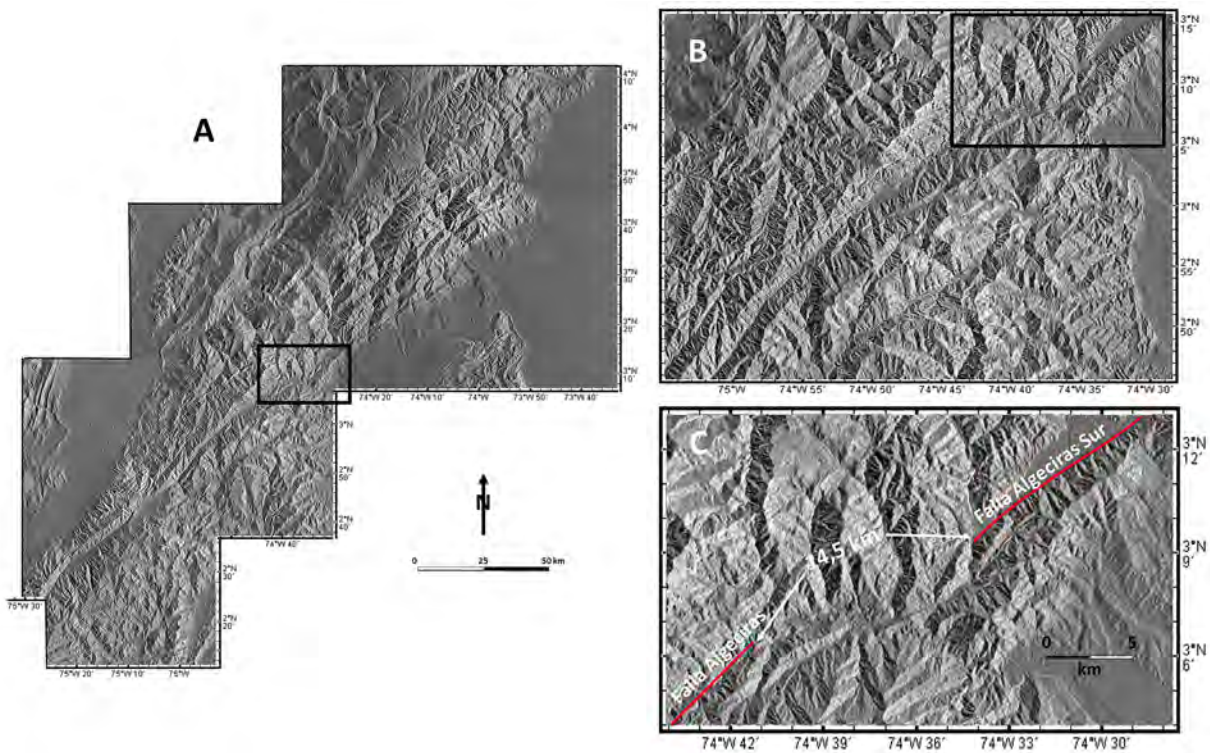


Figura 15. Imágenes ALOS PALSAR indicando en detalle la segmentación de la Falla de Algeciras. **A.** Aspecto regional de la zona de falla, expresada por un surco regional rectilíneo con gran longitud en el sector meridional entre los 2°26'N hasta los 3°06'N (recuadro en A que corresponde a B). Esta falla se segmenta entre los 3°06'N y los 3°09'N (C indicado en el recuadro de B). El salto en la falla corresponde aproximadamente a 14,5 km.

Conclusiones

En esta región se ha presentado una actividad sísmica superficial que obedece al accionar de fallas diferentes. Solo una de estas regiones, la que corresponde al piedemonte llanero del departamento del Meta, se relacionó con la actividad sismogénica del Sistema del Fallas de Algeciras, y esta se manifestó con el sismo

Mw 6.0 del 24 de diciembre de 2019. Los sismos que se presentaron durante el lapso 2016-2018 en la región del municipio de Colombia en el departamento del Huila obedecieron a la actividad de la Falla Altamira, que es una falla inversa que separa rocas de edad Paleozoica con rocas de edad Meso-Cenozoica al oeste, y define la divisoria de aguas en esta parte de la Cordillera Oriental. Los sismos de la región de Colombia, Huila, los cuales

en magnitud no superaron Mw 5.4, al igual que el sismo de Mesetas de diciembre de 2019, produjeron pánico en el centro de Colombia, especialmente en el área metropolitana de Bogotá. Con respecto a la Falla Altamira, a esta se relaciona un sismo que ocurrió a principios de 2021 con Mw 4.8, y que se ubicó a 30 km al suroeste de Colombia, Huila.

Desde el punto de vista de la neotectónica, ninguna de estas fallas a la fecha ha tenido estudios en las regiones que se analizaron en este trabajo, sin embargo, la Falla Altamira, en su vecindad con la Falla Algeciras en la cuenca de Lagunillas, bastante al sur de este estudio, tuvo un reporte por el Servicio Geológico Colombiano. Lo extenso de esta región, su difícil acceso, la densa vegetación predominantemente boscosa, con clima tropical amazónico, dificultan la labor de encontrar indicios de neotectónica, al igual que un control tectono - estratigráfico para poder indicar un marco geotectónico preciso en esta región de la Cordillera Oriental. Por lo anterior, se han encontrado hallazgos como la segmentación de la Falla Algeciras, con la ayuda de imágenes satelitales a escala pequeña (< a 1:50.000), ya que a escala mediana (1.100.000 o más) se puede malinterpretar la extensión de los elementos tectónicos como fallas. Con esto se puede inferir la máxima magnitud esperada para el mismo. La combinación entre este reconocimiento de las fallas y el estilo morfotectónico del paisaje analizado ayuda de manera preliminar a indicar las estimaciones del potencial sismogénico para estas regiones de Colombia.

Agradecimientos

Este trabajo es el resultado de las investigaciones y las labores encaminadas a difundir el alcance de la amenaza sísmica en la ciudad de Villavicencio y el centro de Colombia por parte de los grupos de investigación Geoamenazas e Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería Civil y GAUV de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Santo Tomás, sede Villavicencio, con el apoyo de investigadores del Grupo de Geofísica del Departamento de Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, y el grupo de investigación Georiesgos de la Universidad del Valle en Cali. Se agradece a las estudiantes del programa de Ingeniería Civil (hoy egresadas) Lina Fernanda Sabogal-Ríos y Natalia Cruz-Castañeda, y de manera especial al profesor Andreas Kammer y a Alejandro Piraquive-Bermúdez por su apoyo en la recolección de datos en campo. Esta

investigación formó parte del proyecto “Evaluación sismotectónica del Sistema de Fallas de Algeciras, segunda fase: evolución geotectónica”, que contó con financiación del Comité Financiero de la Universidad Santo Tomás, sede Villavicencio, mediante el Acta n.º 010 aprobada el 22 de marzo de 2017. Se agradece igualmente al profesor Armando Espinosa-Baquero y a dos revisores anónimos, gracias a sus sugerencias se consiguió mejorar y enriquecer este artículo.

Referencias

- AFS (2020). Alaska Satellite Facilities Data Search Vertex. Fairbanks, AK, USA: University of Alaska. <https://search.asf.alaska.edu/#/>
- AIS-UNIANDES-INGEOMINAS (1996). *Estudio general de amenaza sísmica de Colombia*. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica – AIS. Comité AIS-300, Bogotá.
- Anderson, T.H.; Schmidt, V.A. (1983). The evolution of Middle America and the Gulf of Mexico - Caribbean Sea region during Mesozoic time. *GSA Bulletin*, 94(8), 941-966. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1983\)94<941:TEOMAA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1983)94<941:TEOMAA>2.0.CO;2)
- Aránzazu, J.M.; Patiño, A.; Quiñones, C.; Tovar, A.; Buitrago, J.; Moreno, M.; Hincapié, G.; Castelblanco, E. (2015a). Mapa geológico de la plancha 285 San Martín. Mapa y memoria, escala 1:100000. Bogotá. Servicio Geológico Colombiano.
- Aránzazu, J.M.; Castelblanco, E.; Ceballos, L.; López, C.; Patiño, A.; Buitrago, J.; Quiñones, C.; Hincapié, G. (2015b). Geología de la plancha 305 San Juan de Arama. Mapa y memoria, escala 1:100000. Bogotá. Servicio Geológico Colombiano.
- Aránzazu, J.M.; Castelblanco, E.; Tovar, A.; Ramos, J.; Quiñones, C.; Ojeda, C.; Facio-Lince, I.; Gómez, L. (2015c). Geología de la plancha 326 Vistahermosa. Mapa y memoria, escala 1:100000. Bogotá. Servicio Geológico Colombiano.
- Aspden, J.A.; Fortey, N.; Litherland, M.; Viteri, F.; Harrison, S.M. (1992). Regional S-type granites in The Ecuadorian Andes: Possible remnants of the breakup of western Gondwana. *Journal of*

- South American Earth Sciences*, 6(3), 123-132. [https://doi.org/10.1016/0895-9811\(92\)90002-G](https://doi.org/10.1016/0895-9811(92)90002-G)
- Bull, W.B. (2007). *Tectonic geomorphology of mountains: A new approach to paleoseismology*. Blackwell Science Ltd.
- Bull, W.B. (2009). *Tectonic Active Landscapes*. Blackwell Science Ltd.
- Burbank, D.W.; Anderson, R.S. (2001). *Tectonic Geomorphology*. Blackwell Science Ltd.
- Butler, K.; Schamel, S. (1988). Structure along the eastern margin of the Central Cordillera, Upper Magdalena Valley, Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 1(1), 109-120. [https://doi.org/10.1016/0895-9811\(88\)90019-3](https://doi.org/10.1016/0895-9811(88)90019-3)
- Caicedo, J.C.; Yasir, L.H.; Acosta, G.J. (2002). Geología de la plancha 265 Icononzo, Escala 1:100.000. INGEOMINAS.
- Chicangana, G. (2005a). The Romeral Fault System: a shear and deformed extinct subduction zone between oceanic and continental lithospheres in northwestern South America. *Earth Sciences Research Journal*, 9(1), 50-66.
- Chicangana, G. (2005b). Estudio del Sistema de Fallas de Romeral (0,5° - 11,5° N), a partir de una caracterización sismotectónica regional. M.Sc. Tesis, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Chicangana, G.; Pedraza, G.P.; Vargas-Jiménez, C. (2012). Avances en el conocimiento de los patrones de sismicidad superficial en el Piedemonte Llanero colombiano, Departamentos de Casanare y Meta, Colombia. *XVI Congreso Peruano de Geología*, Lima, Perú.
- Chicangana, G.; Vargas, C.A. (2013). The subduction geometry change under Colombia and orogenic evolution of the northern Andes in late Neogene times. *Acta Geologica Sinica*, 87(Supp), 116-118.
- Chicangana, G.; Bocanegra, A.; Arboleda-Montes, L.; Kammer, A. (2020). La búsqueda del patrimonio Geoturístico en el Piedemonte Llanero Colombiano y llanuras adyacentes: implicaciones para el origen del paisaje actual. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 47, 27-38. <https://doi.org/10.15446/rbct.n47.83876>
- Cossio, O.U.; Rodríguez, G.G.; Rodríguez, G.M.A. (1994). Geología de la plancha 283 Purificación, Escala 1:100.000. Bogotá: INGEOMINAS.
- Cristancho, A.; Ojeda, C. (2015). Mapa geológico de la plancha 346 Cerro Neiva. Escala 1:100.000. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- DeCelles, P.G. (2012). Foreland basin systems revisited: Variations in response to tectonic settings. In: C. Busby, A. Azor. (Eds). *Tectonics of Sedimentary Basins: Recent Advances* (pp. 405-426). John Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781444347166.ch20>
- de Jossineau, G.; Aydin, A. (2009). Segmentation along Strike-Slip Faults Revisited. *Pure and Applied Geophysics*, 166(10-11), 1575-1594. <https://doi.org/10.1007/s00024-009-0511-4>
- Diederix, H.; Bohórquez, O.P.; Mora-Páez, H.; Peláez, J.R.; Cardona, L.; Corchuelo, Y.; Ramírez, J.; Díaz-Mila, F. (2020). The Algeciras Fault System of the Upper Magdalena Valley, Huila Department. In: J. Gómez, A.O. Pinilla-Pachón (eds.). *The Geology of Colombia* (pp. 423-452). Volume 4. Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.38.2019.12>
- Ekström, G.; Nettles, M.; Dziewonski, A.M. (2012). The global CMT project 2004 - 2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 200-201, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2012.04.002>
- ESA (2020). Copernicus Open Access Hub. Paris: The European Space Agency, European Union. <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>
- Espinosa, A. (2004). *La historia sísmica de Colombia (1500 - 1830)*. GEDES - Universidad del Quindío.
- Fuquen, J.A.; Osorno, J.F. (2002). Geología de la plancha 303 Colombia, departamentos de Huila, Tolima y Meta (Escala 1:100.000). Bogotá: INGEOMINAS.

- Gómez, J.; Montes, N.E.; Nivia, A.; Diederix, H. (2015). Atlas geológico de Colombia 2015. Escala 1:500.000. Servicio Geológico Colombiano.
- Gómez, T.J.; Montes, N.E. (2021). Geologic Map of Colombia 2020. Scale 1:1.000.000. Servicio Geológico Colombiano.
- Hanks, T.C.; Bakun, W.H. (2014). M-logA models and other curiosities. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(5), 2604-2610. <https://doi.org/10.1785/0120130163>
- Havskov, J.; Ottemoller, L. (1999). SeisAn Earthquake analysis software. *Seismological Research Letters*, 70(5), 532-534. <https://doi.org/10.1785/gssrl.70.5.532>
- IDEAM. (2005). Atlas Climático de Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/atlas>
- IRIS. (2018). 1967 Huila (Colombia) Earthquake Archive. Incorporated Research Institutions for Seismology. <http://www.iris.edu/seismo/quakes/1967huila/>
- Kammer, A.; Támara, J.; Beltrán, A.; Robles, W. (2007). Pliegues sobrepuestos en el anticlinal de Buenavista, Piedemonte Llanero. *Boletín de Geología*, 29(2), 85-93.
- Kortström, J.; Uskii, M.; Tiira, T. (2016). Automatic classification of seismic events within a regional seismograph network. *Computers & Geosciences*, 87, 22-30. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.11.006>
- 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.; Pérez, J.; Cubillos, M.; Fandiño, J.; Martínez, D.; Castillo, E.; Báez, L.; Suárez, O.; Agudelo, A.; Pérez, L.; Idárraga, J.; López, N.; Mora-Páez, H.; Corchuelo, Y.; Giraldo, L.; Gómez, E.; 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.
- McCalpin, J.P. (2009). *Paleoseismology*. International Geophysics Series, 95. 2nd Edition. Academic Press.
- Mogi, K. (1985). *Earthquake Prediction*. Academic Press.
- Mojica, J.; Kammer, A. (1995). Eventos Jurásicos en Colombia. *Geología Colombiana*, 19, 165-172.
- Mora, A.; Parra, M.; Strecker, M.R.; Kammer, A.; Dimaté, C.; Rodríguez, F. (2006). Cenozoic contractional reactivation of Mesozoic extensional structures in the Eastern Cordillera of Colombia. *Tectonics*, 25(2). <https://doi.org/10.1029/2005TC001854>
- Mora, A.; Parra, M.; Strecker, M.R.; Sobel, E.R.; Zeilinger, G.; Jaramillo, C.; Ferreira Da Silva, S.; Blanco, M. (2010). The eastern foothills of the Eastern Cordillera of Colombia: An example of multiple factors controlling structural styles and active tectonics. *GSA Bulletin*, 122(11-12), 1846-1864. <https://doi.org/10.1130/B30033.1>
- Muñoz-Burbano, F.J.; Vargas-Jiménez, C.A.; Chicangana, G. (2015). Sismicidad en el piedemonte llanero colombiano: caracterización, relocalización y tomografía sísmica local. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 38, 14-24. <https://doi.org/10.15446/rbct.n38.45681>
- Noriega-Londoño, S.; Bermúdez, M.A.; Restrepo-Moreno, S.A.; Marín-Cerón, M.I.; García-Delgado, H. (2021). Earthquake ground deformation using DInSAR analysis and instrumental seismicity: The 2019 M 6.0 Mesetas Earthquake, Meta, Colombian Andes. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 73(2). <https://doi.org/10.18268/BSGM2021v73n2a090221>
- Ojeda, A.; Havskov, J. (2001). Crustal structure and local seismicity in Colombia. *Journal of Seismology*, 5(4), 575-593. <https://doi.org/10.1023/A:1012053206408>
- París, G.; Machette, M.N.; Dart, R.L.; Haller, K.M. (2000). Database and Map of Quaternary faults and folds of Colombia and its offshore regions. Open - File Report 00 - 0284. Comprende mapa a escala 1:2.500.000 e informe. USGS.

- Patiño, A.; Barrantes, L.; Buitrago, J.; Cristancho, A. (2015a). Mapa geológico de la plancha 284 Santana, Escala 1:100.000. Servicio Geológico Colombiano.
- Patiño, A.; Quiñones, C.; Cristancho, A.; Zafra, M.; Cabrera, J.C. (2015b). Mapa geológico de la plancha 304 La Uribe, Escala 1:100.000. Servicio Geológico Colombiano.
- Radic, J.P. (2004). Late Cretaceous to Cenozoic evolution of the Girardot Basin, Upper Magdalena Valley, Colombian Andes. M.Sc. Thesis, Cornell University, New York, USA.
- Ramírez, J.E. (1975). *Historia de los terremotos en Colombia*. IGAC.
- Ramos, J.; Casas, R.; Romero, O.; Cristancho, A.; Ibáñez, R. (2015). Mapa geológico de la plancha 324 Tello. Escala 1:100.000. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Sánchez-Villar, N.F. (2011). Desarrollo de patrones de fracturamiento y mecanismos de deformación del anticlinal de Monterral, Piedemonte Llanero, Cordillera Oriental de Colombia. M.Sc. Tesis, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Sarabia, A.M.; Cifuentes, H.G.; Robertson, K. (2010). Análisis histórico de los sismos ocurridos en 1785 y en 1917 en el centro de Colombia. *Cuadernos de Geografía, Revista Colombiana de Geografía*, 19, 153-162. <https://doi.org/10.15446/rcdg.n19.16863>
- Sarmiento-Rojas, L.F.; Van Wess, J.D.; 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. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2006.07.003>
- Scanvic, J.Y. (1989). *Teledetección aplicada*. Paraninfo.
- Scholz, Ch.H. (2002). *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. Second Edition, Cambridge University Press.
- Scholz, Ch.H. (2018). *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. Third Edition, Cambridge University Press.
- SGC (2020). Consulta información sismos. Servicio Geológico Colombiano. <http://bdrsnc.sgc.gov.co/paginas1/catalogo/index.php>
- SGC (2021). Catalogo Mecanismo Focal y Tensor Sísmico. Servicio Geológico Colombiano. http://bdrsnc.sgc.gov.co/sismologia1/sismologia/focal_seiscomp_3/index.html
- Tamara, J.; Mora, J.; Robles, W.; Kammer, A.; Ortiz, A.; Sanchez-Villar, N.; Piraquive, A.; Rueda, L.H.; Casallas, W.; Castellanos, J.; Montaña, J.; Parra, L.G.; Corredor, J.; Ramirez, A.; Zambrano, E. (2015). Fractured reservoirs in the Eastern Foothills, Colombia, and their relationship with fold kinematics. *AAPG Bulletin*, 99(8), 1599-1633. <https://doi.org/10.1306/09291411109>
- Toro-Toro, L.M.; Moreno-Sánchez, M.; Gómez-Cruz, A. (2014). Metagabro del Ariari, plutonismo MORB, Cordillera Oriental de Colombia. *Boletín de Geología*, 36(2), 15-24.
- USGS (2020). EarthExplorer. Sioux Falls, SD: USGS Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Velandia, F.; Acosta, J.; Terraza, R.; Villegas, H. (2005). The current tectonic motion of the Northern Andes along the Algeciras Fault System in SW Colombia. *Tectonophysics*, 399(1-4), 313-329. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.12.028>
- Vinasco, C.; Cordani, U.; González, H.; Vasconcelos, P.; Liu, D. (2003). Tectonomagmatic evolution of the Northern part of the Central Cordillera of Colombia using Ar-Ar and U-Pb SHRIMP Methodologies. *IX Congreso Colombiano de Geología*, Medellín, Colombia.
- Wells, D.L.; Coppersmith, K.J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4), 974-1002. <https://doi.org/10.1785/BSSA0840040974>

Fecha de recibido: 12 de septiembre de 2018

Fecha de aprobado: 10 de noviembre de 2021
