

# ASPECTOS GEOTECTÓNICOS Y SISMOTECTÓNICOS DEL SISTEMA DE FALLAS DE LA FALLA FRONTAL DE LA CORDILLERA ORIENTAL

Germán Chicangana <sup>1,2</sup>, Carlos A. Vargas <sup>2</sup>, Andreas Kammer <sup>2</sup>, Luis H. Ochoa G <sup>2</sup> y Tulio A. Hernández H. <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Escuela de Ingenierías, Corporación Universitaria del Meta, Villavicencio, Colombia.

<sup>2</sup> Grupo de Geofísica, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C.,

[gechicanganam@bt.unal.edu.co](mailto:gechicanganam@bt.unal.edu.co), [cavargasj@unal.edu.co](mailto:cavargasj@unal.edu.co), [akammer@unal.edu.co](mailto:akammer@unal.edu.co), [lhochoag@unal.edu.co](mailto:lhochoag@unal.edu.co), [ingetulio@yahoo.com](mailto:ingetulio@yahoo.com)

## INTRODUCCIÓN

La sismicidad histórica de la región del *Piedemonte Llanero* colombiano, en vecindades de la ciudad de Villavicencio en el centro del país (*Figura 1*), tiene poca documentación, y esta situación obedece a que ésta fue colonizada de manera importante solo a partir de la segunda mitad del siglo XIX.

Recientemente *Cifuentes et al. (2006)*, señalan como responsable del sismo con  $M_s = 6.9$ , ocurrido el 31 de agosto de 1917, a un plano de falla ubicado en vecindades de la ciudad de Villavicencio (500,000 habitantes en la actualidad). Dicho plano de falla pertenece al *Sistema de Fallas de la Falla Frontal de la Cordillera Oriental - SFFFCO*.

En este trabajo se realizó un modelo geotectónico en 3D a partir del reconocimiento de dichas fallas con la cartografía geológica pre-existente, con campañas de campo que comprendieron chequeo tectono-estratigráfico y reconocimiento de tectónica activa y de evidencias de actividad neotectónica en planos de falla, así como con una verificación con sensores remotos (Imágenes LANDSAT y fotografías aéreas), y con el registro sísmológico tanto histórico como instrumental existente para esta región del país.

Este modelo geotectónico en 3D pretende mostrar desde una manera aproximada y preliminar, la conducta cinemática de los planos de falla relacionados únicamente al SFFFCO, que sean susceptibles de generar un sismo con  $M \geq 6,0$ , de acuerdo con lo observado por *Scholz (2001)*, y otros autores, para fallas del tipo de cabalgamiento (Thrust fault), y conforme a las estimaciones que a partir de neotectónica y de tectónica activa han realizado previamente a fallas relacionadas al SFFFCO *Paris et al. (2000)* y *Chicangana et al. (2007)*.

El resultado de este trabajo es el **definir la conducta cinemática con su respuesta sísmica en los planos de fallas** del SFFFCO para esta región de Colombia, contribuyendo con ello a los estudios sobre la amenaza sísmica para las ciudades de Bogotá y Villavicencio (*Ojeda y Alvarado, 2005*), que INGEOMINAS y otras entidades públicas y privadas han venido realizando en los últimos años, y en particular para dar inicio con la segunda fase del estudio de la *Zonificación Sismogeotécnica de la ciudad de Villavicencio*, labor que vienen realizando el *Grupo de Investigación "Estudios para la Amenaza Sísmica y Amenazas Naturales del Piedemonte Llanero"* de la Escuela de Ingenierías de la Corporación Universitaria del Meta de Villavicencio y el *Grupo de Geofísica* el Departamento de Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia en Bogotá D.C., los cuales cuentan con el apoyo de la Asociación Latinoamericana y del Caribe en Geociencias – GEOSLAC.

## MARCO GEOTECTÓNICO

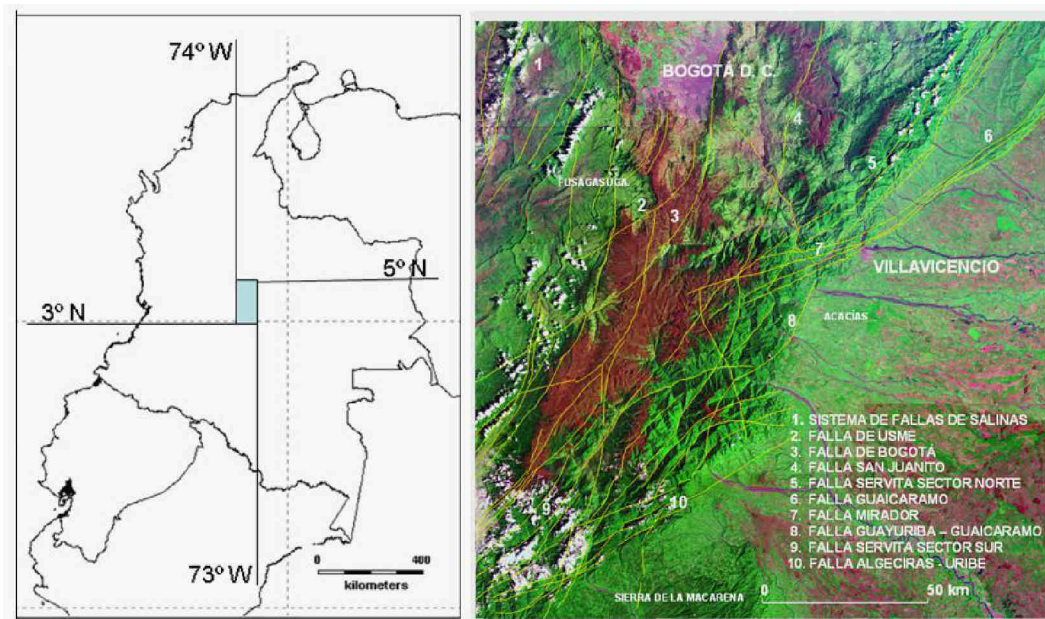


Figura 1. Localización de la región de estudio y de algunas de las Fallas principales del SFFCO.

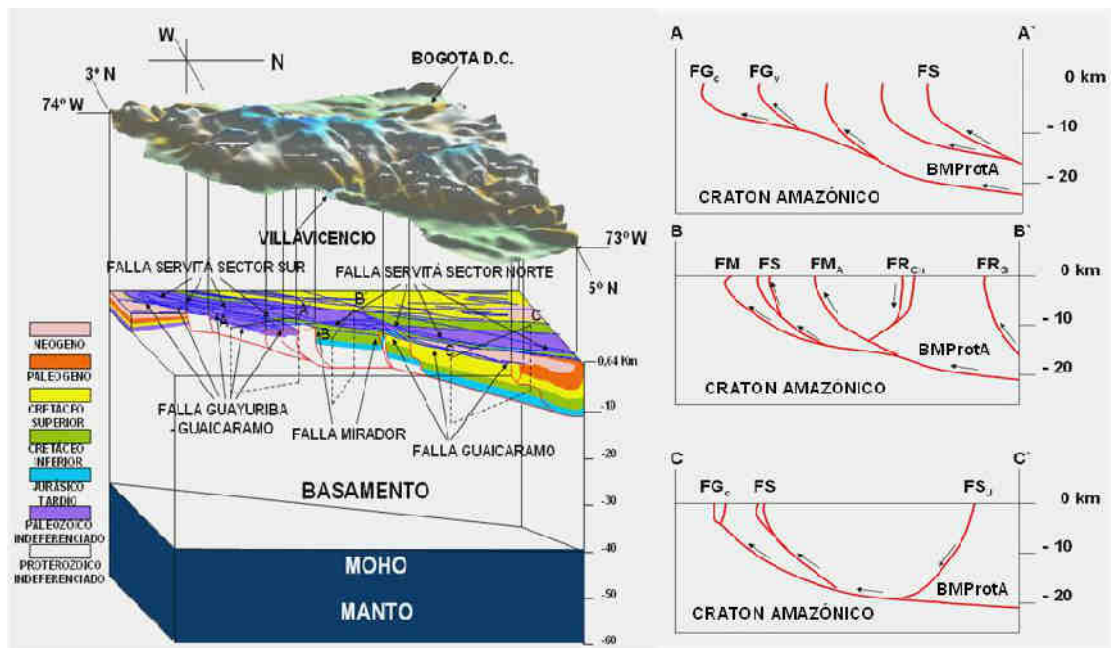


Figura 2. Izquierda, bosquejo general en 3D de la disposición tectono – estratigráfica con su escenario litosférico de la región de estudio, a la derecha, perfiles A–A', B–B', y C–C' dispuestos en sentido E – W, los cuales se ubican en la figura de la izquierda. FG<sub>C</sub>: Falla Guaicaramo; FG<sub>Y</sub>: Falla Guayuriba; FM: Falla Mirador; FM<sub>A</sub>: Falla Manzanares; FR<sub>Ch</sub>: Falla Río Chiquito; FR<sub>G</sub>: Falla Gallo; FS: Falla Servitá; FS<sub>J</sub>: Falla San Juanito. BMProtA: Basamento Meso–Proterozoico Andino. Tomado de Chicangana et al. (2007).

El bloque central de la *Cordillera Oriental* en Colombia definido entre los 3° N y 6° N, a diferencia de sus bloques meridional y septentrional, se caracteriza por no exhibir litologías del basamento *Meso–Proterozoico Andino* (Chicangana et al., 2007).

En este bloque, las unidades de roca más antiguas pertenecen al Complejo Quetame, que está compuesto por rocas metamórficas de bajo grado y abarca edades que corresponden al lapso *Siluriano–Ordovícico* (Maya, 2001).

Todas las litologías que conforman la *Cordillera Oriental* se encuentran afectadas por varios episodios tectónicos, donde el grado de afectación por tectónica en los paquetes rocosos es directamente proporcional a su edad. Por esta razón se considera que el basamento *Meso–Proterozoico* presenta, al menos, varias historias de deformación tectónica que cubren el lapso *Proterozoico–Presente*, donde, en sectores de los bloques rocosos, la conducta regirá su respuesta tectónica en toda su historia geológica a modo de herencia, como lo son los planos de falla y estructuras derivados de la colisión Proterozoica inicial entre Laurentia y Gondwana.

Estas estructuras, que originaron en las escamas o prismas y planos de acreción que se desarrollaron en dicha colisión, variaron igualmente en su geometría y cambiaron en algunos casos su polaridad a lo largo del tiempo.

De esta manera se propone que el actual frente de cabalgamiento, que define la *Falla de Guaicaramo* desde el norte de nuestra región de estudio, junto con la *Falla Servitá* y la *Falla Guayuriba–Guaicaramo*, y extendiéndose hasta la *Falla Algeciras-Urbe* hacia el Sur, son el límite de la acreción Proterozoica en el basamento (Figuras 1, 2 y 3).

En síntesis, estas estructuras han definido los planos en profundidad de los posibles límites de la acreción, expresándose como fallas con vergencia hacia el Este con un alto ángulo hacia la superficie pero con muy bajo ángulo en profundidad (Mora et al., 2006; Chicangana et al., 2007).

En la evolución de los planos principales de la acreción es muy posible que estos sufrieran, posterior a su creación, varias reactivaciones tectónicas de primer orden, las cuales se verifican por las sucesivas discordancias que, desde el punto de vista estratigráfico, se observan para el Paleozoico y el Mesozoico en el flanco oriental de la Cordillera Oriental (Chicangana et al., 2007).

En estos episodios tectónicos se pone en evidencia un período transtensional Mesozoico que resultó quizás de un efecto sin-orogénico que se manifestó principalmente durante el Cretáceo Inferior en los Andes del Norte.

El resultado de esta fase transtensional produjo en muchos de los planos fundamentales del basamento una reactivación manifestada por una inversión tectónica negativa, que dio lugar a la aparición de nuevas fallas con tendencia normal en la cobertera Fanerozoica.

Durante el Cenozoico, tanto las estructuras superficiales, que se originaron durante el Cretáceo Inferior, como las que comprometen además al basamento con mayor antigüedad y dimensión, sufrieron un proceso de inversión tectónica positiva durante las dos principales fases de acortamiento litosférico que se presentaron en la esquina NW de Suramérica.

La primera fase de acortamiento fue para el Paleógeno y dio origen a la discordancia del Eoceno Medio. La segunda fase fue para el Plioceno, y fue que dio origen al estilo estructural observado hoy en día en este sector de la Cordillera Oriental (Chicangana et al., 2007).

## SISMOTECTONICA

Desde un punto de vista geotectónico, las rocas que componen el sector estudiado se enmarcan en una zona de colisión intracontinental, que está delineada por el frente de cabalgamiento de las Fallas Guaicaramo y Servita hacia el Oriente del sector en límites con los Llanos orientales (Figura 2).

Estas fallas se clasifican como fallas cabalgantes con carácter lístrico en profundidad que definen estructuras plegadas en el medio dúctil siguiendo una propagación de éstas sobre el plano de la falla (McKlay, 1997). La exhumación de las litologías Paleozoicas y del basamento Meso–Proterozoico hacia el sector Oriental, que se presentan entre las Fallas Servita y San Juanito al norte de este sector (Mora et al., 2006), hace presuponer una contracción litosférica, en donde su backstop o frente de cabalgamiento son las mismas fallas en el contacto entre los basamentos.

Su estilo estructural es muy similar al de las fallas de cabalgamiento en cuencas extensionales en fase de inversión tectónica (McKlay, 1997). Al ser las Fallas *Guaicaramo*, *Mirador*, *Servitá* y *Guayuriba–Guaicaramo* los principales elementos estructurales en este sector del piedemonte llanero, la **sismicidad registrada se debe al accionar de estos planos lístricos en profundidad con movimientos, tanto verticales como horizontales** (NEIC, 2008), en donde el friccionamiento entre los basamentos producen la ruptura de asperidades entre estos dando origen a los sismos (figura 3).

Para indicar la actividad sísmica del Piedemonte Llanero (Figura 4) se hace referencia aquí a la sismicidad histórica mediante la elaboración de un catálogo compilado de varias fuentes (Chicangana, 2005), y recalculado para el propósito (Chicangana et al., 2007), y a los registros instrumentales de la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC) para el período 1993 – 2001 (INGEOMINAS, 2001). La sismicidad histórica contempla solamente los sismos históricos con Intensidades  $\geq$  VII sentidos en Bogotá desde 1616 los cuales en total han sido 13 (Espinosa, 2004; Chicangana et al., 2007). El inconveniente de esta información (NEIC, 2001), es que no da seguridad de si el hipocentro o foco, reportado en el catálogo histórico se relacionó con alguna de las fallas del SFFFCO. Con el registro de la sismicidad instrumental correspondiente al período 1993 – 2001 de la RSNC, la interpretación que debe darse a este catálogo es simplemente de que muestra las regiones que probablemente tengan mayor actividad sísmica, pero las falencias en el registro para la ventana de tiempo contemplada al presentar una falta de homogeneidad respecto a los reportes sísmicos durante el lapso 1993 - 2001, imposibilitan un calculo óptimo tanto del parámetro b como del valor de z en dicho catálogo (Chicangana, 2005), además de que con esta información es imposible distinguir la conducta de un plano de falla a nivel individual con  $0 < h < 36$  km, debido a las limitaciones de la red sismológica con respecto al número de estaciones que posee (18 estaciones) las cuales abarcan más del 50 % del área del país, el cual es muy poco para poder cumplir con este propósito en una región tan grande como lo es el centro de Colombia (Gómez y Salcedo, 2000).

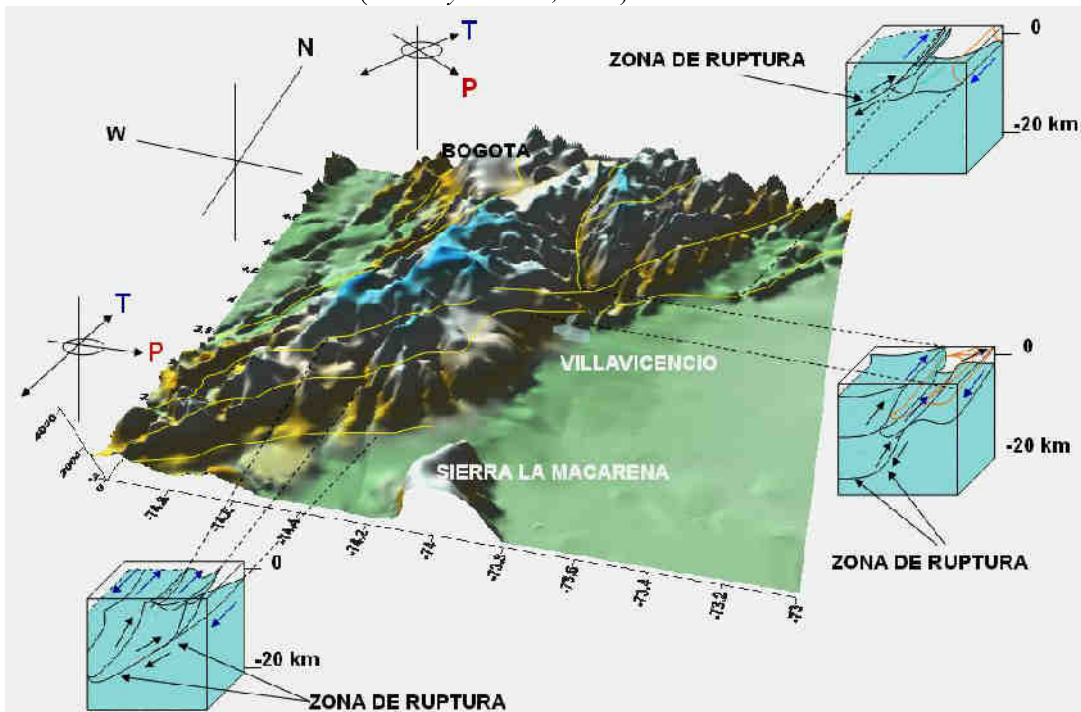


Figura 3. Modelo de elevación digital que muestra los campos de esfuerzos predominantes para el sector central de la Cordillera Oriental (P: Compresión, T. Extensión), y las principales tendencias cinemáticas en 3D como respuesta a este efecto tectónico en tres diferentes sectores del SFFFCO exhibidos en los cubo diagrama.

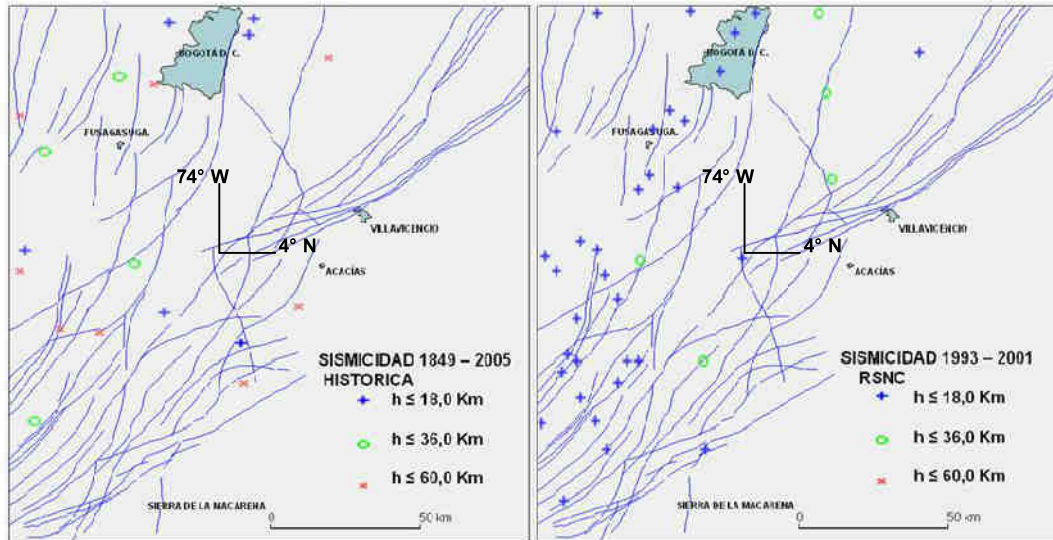


Figura 4. Mapas sismotectónicos generales para  $h \leq 60$  km con  $M_s \geq 4$  para la sismicidad histórica que comprende el lapso 1849 – 2005 (Chicangana et al., 2007), a la izquierda, y del registro instrumental de la RSNC (INGEOMINAS, 2001), para el período 1993 - 2001 con  $M_L \geq 2,5$  a la derecha.

De acuerdo a esta evaluación (Figura 4), se observó, de manera muy preliminar, que la actividad sísmica es bastante moderada hacia el sector sur de los  $4^\circ$  N, pero en términos de macrosísmica no hay información clara de sismicidad somera para este sector, ni para tiempos históricos, ni constatación de los eventos registrados para el periodo que abarca la sismicidad instrumental aplicada aquí.

Debido a las limitaciones ya descritas del catalogo entonces, en el registro instrumental de la RSNC se presenta entonces una aparente someridad de los focos ( $h \leq 18$  km) con respecto a eventos con magnitudes  $M_L \leq 3,0$ , pero con esta información, es posible relacionar la sismicidad al sur de los  $4^\circ$  N con la *Falla Guayuriba–Guaicaramo*, la *Falla Servitá* en su sector sur y la *Falla Algeciras–Uribe*. Al norte de esta latitud la sismicidad es muy baja pero igualmente su profundidad no es clara con los reportes de ambas fuentes (Figura 4), y es muy posible que los pocos eventos que aparecen en este sector con profundidad  $h \leq 36$  km estén relacionados con la *Falla Guaicaramo* en profundidades que oscilen entre 5 y 30 km. La disposición geométrica del buzamiento de las Fallas Guaicaramo y Servitá, por ser de cabalgamiento y lístricas, hace posible esta idea.

Hacia el sur, la geometría de los planos de fallas relacionados al SFFFCO es igual y la sismicidad obedece a iguales circunstancias. El modelo sismotectónico basado en las observaciones de campo desde el punto de vista del chequeo tectono – estratigráfico, junto con la evidencia de tectónica activa y de evidencias de neotectónica en estas grandes fallas tanto al norte como al sur de los  $4^\circ$  N, indicaría de forma muy preliminar que los sismos en esta región están relacionados a la respuesta de esfuerzos que se presentan en los cabalgamientos del SFFFCO, en donde la microsismicidad se generaría en los planos de falla en profundidades que oscilan de entre 5 y quizás hasta más de 30 km.

Con esta evaluación sismotectónica preliminar se concluye entonces que se destaca una baja actividad sísmica entre los  $4^\circ$  N y los  $5^\circ$  N, y una actividad sísmica moderada de entre los  $3^\circ$  N y  $4^\circ$  N. Desde un punto de vista regional y con el apoyo de sensores remotos y observaciones en campo en lo concerniente a tectónica activa, las Fallas Guaicaramo y Servitá, en el sector norte, son los candidatos potenciales para producir sismos someros con una magnitud  $M \geq 6,0$ , situación que es igual para las Fallas Guayuriba–Guaicaramo o Mirador cerca a los  $4^\circ$  N.

## CONCLUSIONES

Con los resultados preliminares de este trabajo se hace obvio que estas fallas contribuyen a la amenaza sísmica de las ciudades de Bogotá y Villavicencio, pero aun la falta de información sismológica en el sentido paleosismológico, neotectónico y del registro de sismicidad instrumental optima por la falta de

una red sismológica local, han sido el inconveniente por el momento para poder estimar con seguridad, cual de estas puede, en el corto plazo, generar un gran sismo, ya que, por la falencia de este tipo de estudios, aun no se ha podido determinar su ciclo sísmico. La realización de investigaciones que seguirán en el corto plazo deberán ayudar a resolver este interrogante.

## BIBLIOGRAFÍA

- Chicangana, G. 2005. Estudio del Sistema de Fallas Romeral (0,5 – 11,5 ° N), a partir de una caracterización sismotectónica regional: Tesis de Maestría en Ciencias – Geología, Departamento de Geociencias, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia - UNCB-, Bogotá D.C. 191p, 6 Anexos. (No publicada).
- Chicangana, G., Vargas, C. A., Kammer, A., Hernández Hernández, T. A. & Ochoa Gutiérrez, L. H. 2007. Caracterización Sismotectónica Regional Preliminar de un sector del Piedemonte Llanero colombiano: Corredor San Juan de Arama – Cumaral, Meta: Boletín de Geología – UIS, n° 29, p. 61 – 74.
- Cifuentes, H. G., Sarabia, A. M., Robertson, K. G. y Dimaté, A. C. 2006. Parámetros Macrosísmicos del Sismo de 1917 en Colombia. *Memorias del II Congreso Latinoamericano de Sismología*, En CD – Room.
- Espinosa, A. 2004. Historia Sísmica de Colombia (1550 – 1830): Gedes – Uniquindío (En CD – ROOM).
- Gómez, C. A. A. y Salcedo, E. 2000. Determinación de la profundidad focal de algunos sismos ocurridos en Colombia a partir de datos macrosísmicos: Red Sis. Reg. Eje Cafetero Viejo Caldas y Tolima, n° 5, p. 12 – 16.
- INGEOMINAS. 2001. Boletín de Sismos 1993 –2001. INGEOMINAS - RSNC.
- Maya, M. 2001. Distribución, facies y edad de las rocas metamórficas de Colombia: Ingeominas, I – 2426, p. 57.
- McClay, K. R. 1997. *Sipetrol Short Course*: K. R. McClay, p. 313.
- Mora, A., Parra, M., Strecker, M. R., Kammer, A. Dimaté, C. and Rodríguez, F. 2006. Cenozoic contractional reactivation of Mesozoic extensional structures in the Eastern Cordillera of Colombia. *Tectonics*, vol. 25, n° 2, TC2010 Doi: 10.1029/2005TC001854
- NEIC. 2001. SISRA, Earthquake Mitigation Program in Andean Region (Project SISRA), v. 1 – 9, edited by B. Askew & S. T. Algermissen 1985, support with ISC & RSC databases period 1566 - 1991 for Colombia: [http://www.neic.cr.usgs.gov/neic/epic/code\\_catalog.html](http://www.neic.cr.usgs.gov/neic/epic/code_catalog.html); <http://seismo.ethz.ch/gshap/ceresis/ceresi91.dat>
- NEIC. 2008. NEIC Earthquake Hazards Program Moment Tensor and Broadband Source Parameter Search. <http://neic.usgs.gov/neis/sopar/>
- Ojeda, J y Alvarado, C. 2005. Zonificación Sismogeotécnica Indicativa de la Ciudad de Villavicencio. II Seminario de Ingeniería de la Orinoquia y el Piedemonte Llanero, Memorias (En CD – Room). Villavicencio, Colombia, Abril 6 de 2005
- París, G., Machette, R., 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: <http://pubs.usgs.gov/of/2003/opf-00-0284>.
- Scholz, Ch. H. 2001. *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. 2nd Edition, Cambridge University Press, p. 470.