

CARACTERIZACIÓN SISMOTECTÓNICA REGIONAL PRELIMINAR DE UN SECTOR DEL PIEDEMONTES LLANERO COLOMBIANO: CORREDOR SAN JUAN DE ARAMA – CUMARAL, META

Chicangana, G. ^{1,2}; Vargas Jiménez, C. A. ²; Kammer, A. ³; Hernández Hernández, T A. ¹; Ochoa Gutiérrez, L H. ²

RESUMEN

Con la determinación del escenario tectónico regional realizado con sensores remotos, información secundaria y observaciones de campo, se ha encontrado que las fallas relacionadas al Sistema de Fallas de la Falla Frontal de la Cordillera Oriental – SFFFCO, obedecen a una geometría de planos muy seccionados con longitudes máximas de 30 km que representan fallas de cabalgamiento que limitan al basamento Andino con la placa suramericana. Con el apoyo de la sismicidad histórica y del registro instrumental de la RSNC para el período 1993 – 2001, se determinó igualmente poca actividad sísmica entre los 3° y 4° N, y una actividad moderada al sur de esta latitud. Este sector del SFFFCO se caracteriza por presentar planos de tipo lístrico bajo régimen compresivo cuyo buzamiento decrece en ángulo hacia profundidad y la sismicidad obedece a la liberación de esfuerzos de estos planos en la zona de contacto donde convergen los basamentos. La magnitud máxima posible esperada es $M \geq 6,0$, con hipocentros que oscilan entre 5 y 30 km Sin embargo la baja información sismológica y los pocos estudios realizados en estas fallas todavía impiden realizar la estimación en el sentido probabilístico de los periodos intersísmicos en estas.

Palabras Clave: Piedemonte Llanero colombiano, Sistema de Fallas de la Falla Frontal de de la Cordillera Oriental, Geotectónica, Sismicidad, Sismotectónica.

PRELIMINARY SEISMOTECTONIC REGIONAL DETERMINATION OF A ANDEAN EASTERN COLOMBIAN FOOTHILLS SECTOR: SAN JUAN DE ARAMA – CUMARAL, META, COLOMBIA.

ABSTRACT

With the regional tectonic scenario determination carried out with remote sensors, secondary information and field observations, be determined that the faults related to the Eastern Frontal Fault System - EFFS, obeys to a geometry of shortcut planes with maximum longitudes of 30 km, these represent thrust faults that limit to the Andean basement with the South American plate. Also with the support of the historical seismicity and instrumental seismicity registration of the RSNC for the period 1993 - 2001, low seismic activity was determined between 3° and 4° N, and moderate seismic activity to the south of this latitude. This sector of EFFS is composed by listric fault type with low dip angle toward depth under compression stress regime and it seismicity obeys to stress release of these planes in the contact area where the basements converge. The maximum magnitude estimated is $M \geq 6,0$ with 5 – 30 km depth hypocenters. However the low previous seismological information and few studies in these faults yet hinder the realization of earthquake prediction in probabilistic sense for these.

Key Words: Andean Eastern Cordillera Foothill, Eastern Frontal Fault System, Geotectonics, Seismicity, Seismotectonics.

¹ CIM, Corporación Universitaria del Meta, Villavicencio, Colombia, A.A. 3244.

² Grupo de Geofísica, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C.,
gechicanganam@gmail.com; gechicanganam@unal.edu.co

² Grupo de Geofísica, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., cavargasj@unal.edu.co

³ Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., akammer@unal.edu.co

¹ CIM, Corporación Universitaria del Meta, Villavicencio, Colombia. ingtulio@etell.net.co

² Grupo de Geofísica, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., lhochoag@unal.edu.co

INTRODUCCIÓN

En este trabajo a partir del reconocimiento con sensores remotos respaldado por el apoyo de constatación geológica a partir de la cartografía geológica pre-existente y de campañas de campo tanto para esta verificación, como para la evaluación de la morfología tectónica y neotectónica de los principales rasgos tectónicos representativos del Sistema de Fallas de la Falla Frontal de la Cordillera Oriental – SFFFCO, entre los 3° N hasta los 5° N, se procede a realizar un modelo geotectónico en 3D que muestre la conducta cinemática de los planos de falla susceptibles de generar un sismo con $M \geq 6,0$ en esta región. La realización de este modelo está apoyada igualmente con el registro sismológico tanto desde el punto de vista histórico como instrumental existente para esta región del país. El resultado de este trabajo contribuye con los estudios sobre la amenaza sísmica para las ciudades de Bogotá y Villavicencio que nuestros grupos de investigación a nivel interinstitucional se encuentran realizando en la actualidad, para apoyar al proyecto de microzonificación sismogeotécnica de la ciudad de Villavicencio y con el conocimiento del alcance de la amenaza sísmica que este sistema de fallas implica para el centro del país.

ANTECEDENTES

La sismicidad de esta región de Colombia (FIGURA 1), tiene poca documentación. Esta situación se debe a que esta región fue colonizada de manera importante solo a partir del Siglo XIX. Recientemente Cifuentes et al. (2006), con la ayuda de varias técnicas, señalan a un plano de falla del SFFFCO en vecindades de Villavicencio al sismo del 31 de agosto de 1917. Este sismo y el que se presentó en la región de Tauramena en el Departamento de Casanare, el 19 de enero de 1995 con $M_s = 6,9$, son los dos únicos que con certeza científica se le atribuyen a actividad del SFFFCO durante el siglo XX, y quizás para los últimos 500 años que registran la historia del territorio colombiano. De otro lado, la amenaza sísmica del Piedemonte Llanero colombiano determinada desde el punto de vista de la sismicidad intraplaca ha sido muy poco estudiada, y solo desde los trabajos de evaluación neotectónica realizados por Robertson (1989, 2005), tanto para algunos sectores del Departamento de Casanare como para la zona de Villavicencio en concreto, se da inicio a la identificación sobre la determinación de movilidad reciente de planos de fallas asociados al SFFFCO en esta región del Colombia, pero sin indicar con precisión que planos de fallas del sistema produce esta movilidad reciente.

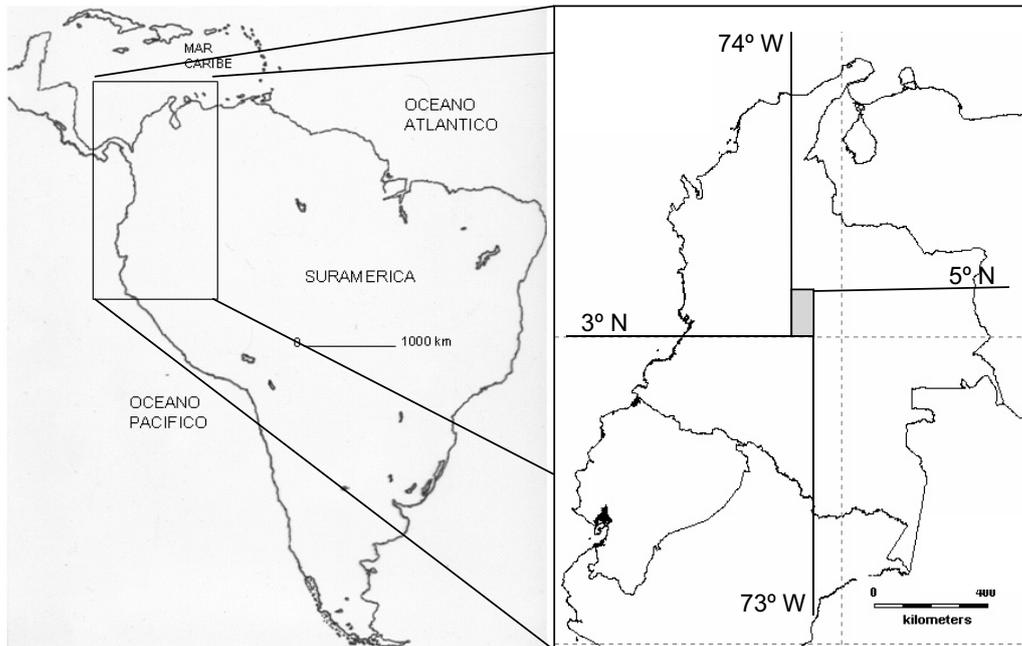
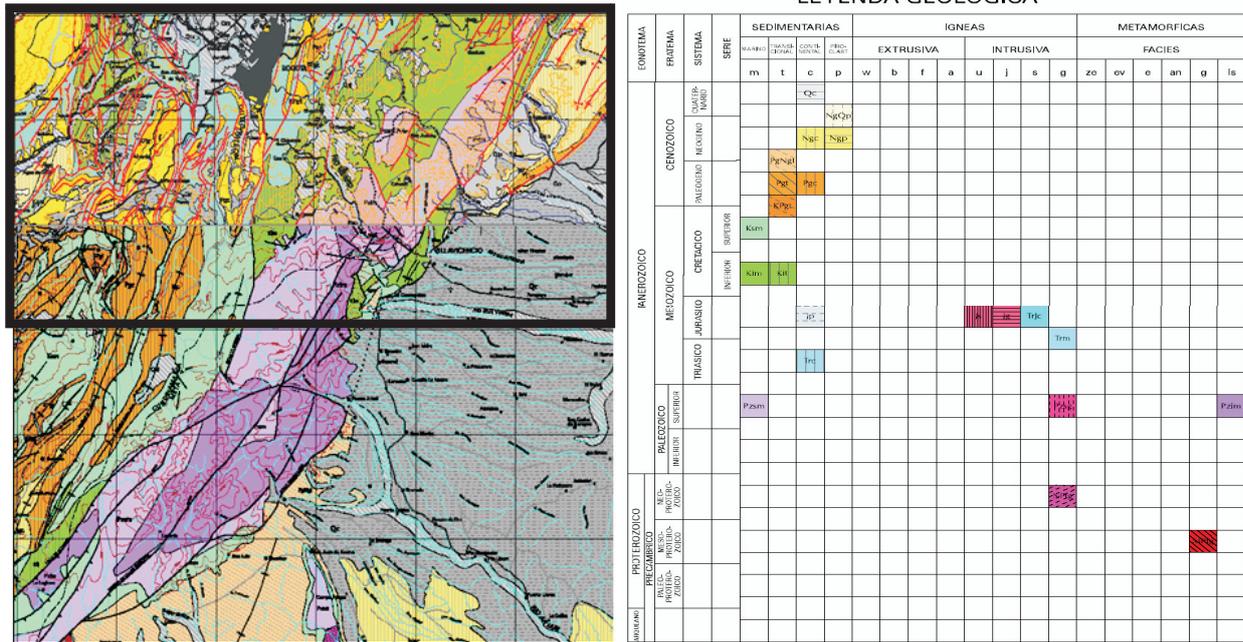


FIGURA 1. Localización de la región de estudio.



predominante, y cuyas edades corresponden al rango Silurico – Ordovícico (Prössl y Grösser, 1990; Maya, 2001; INGEOMINAS, 2002), Mora et al. (2006), con la ayuda de información subsuperficial de la industria petrolera, señalan una relativa proximidad bajo esta cobertera metasedimentaria del basamento Meso – Proterozoico Andino. La Falla de Guaicaramo que forma parte del SFFFCO (FIGURA 3), es el plano que tradicionalmente la literatura geológica ha atribuido que conforma una paleosutura entre el Cratón Amazónico o Escudo de Guyana que abarca edades del lapso Arqueano – Proterozoico, representando el ancestral basamento suramericano al Este de la Falla con el basamento Meso – Proterozoico de tipo Grenviliano al Oeste de esta, el cual se ha correlacionado

con el Terreno Oaxaquense de México y define el basamento Andino en el norte de Suramérica (Noble et al., 1997; Kroonenberg, 2000; Duncan – Keppie et al., 2001, 2003). Sobre estos basamentos se presenta una cobertera Fanerozoica compuesta de rocas metamórficas con predominio de bajo grado y edades Paleozoicas, las cuales subyacen a rocas sedimentarias con diferentes grados de consolidación y edades Meso – Cenozoicas, que en su conjunto presentan un espesor variable que varía de 0,5 hasta más de 5 Km tanto en el Piedemonte Llanero como en los Llanos. Este espesor hacia el sector estudiado varía entre pocos centenares de metros hasta 5 km (INGEOMINAS, 2002; Mora et al., 2006).

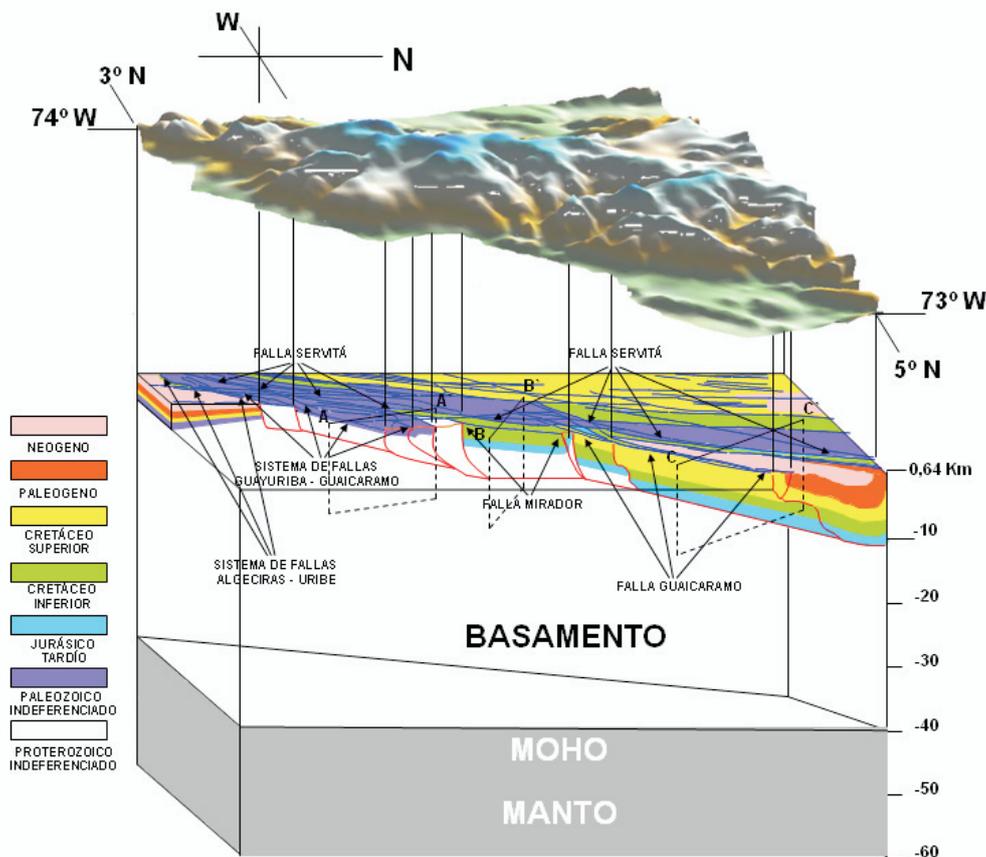


FIGURA 3. Bosquejo general en 3D de la disposición tectono – estratigráfica con su escenario litosférico de la región de estudio, correlacionándose igualmente desde un punto de vista estructural con la ayuda de un DTM tomado de GTOPO30 (USGS, 1998). En este se muestran los principales planos de fallas del SFFFCO, cuya característica es la de ser cabalgamientos. Los perfiles A – A', B – B', y C – C', se pueden observar en la FIGURA 4.

En general todas estas litologías se encuentran afectadas por varios episodios tectónicos, donde el grado de afectación por tectónica en los paquetes rocosos, es directamente proporcional a su edad. De este modo se propone aquí (ya que un estudio de esta naturaleza no se ha realizado a la fecha en Colombia, y que entre otras técnicas que requiere para comprobarse es la aplicación de sísmica profunda con refracción de alto ángulo y muy alta resolución), que el basamento Meso – Proterozoico presenta al menos varias historias de deformación tectónica que cubren el lapso Proterozoico - Presente, los cuales quedaron impresos en sus componentes litológicos, dejando planos de debilidad cuya conducta regirá su respuesta tectónica en toda su historia geológica a modo de herencia. Las estructuras más ancestrales que existen en la distribución actual de la fábrica de las rocas del basamento, son de manera obvia planos de falla y estructuras derivados

de la colisión Proterozoica inicial entre Laurentia y Gondwana, donde su resultado fue la conformación del basamento Meso – Proterozoico Andino en los Andes del Norte. Estas estructuras, la cuales variaron su geometría, y cambiaron en algunos casos su polaridad, como resultado de los sucesivos eventos tectónicos que sufrió el basamento desde el Meso – Proterozoico cuando se originó, y durante el Fanerozoico, deja en claro que las grandes estructuras como las fallas que lo afectan, tienen al menos esta historia. Los puntos de debilidad del basamento, están relacionados con la geometría inicial de la colisión, resultado de los rasgos de las escamas o prismas y planos de acreción iniciales. En general se propone de esta manera, que el actual frente de cabalgamiento que define la Falla de Guaicaramo junto con estructuras como la Falla Servita y la Falla Guayuriba con el Saliente de Guape, delineado por las Fallas Algeciras y Uribe (Hernández,

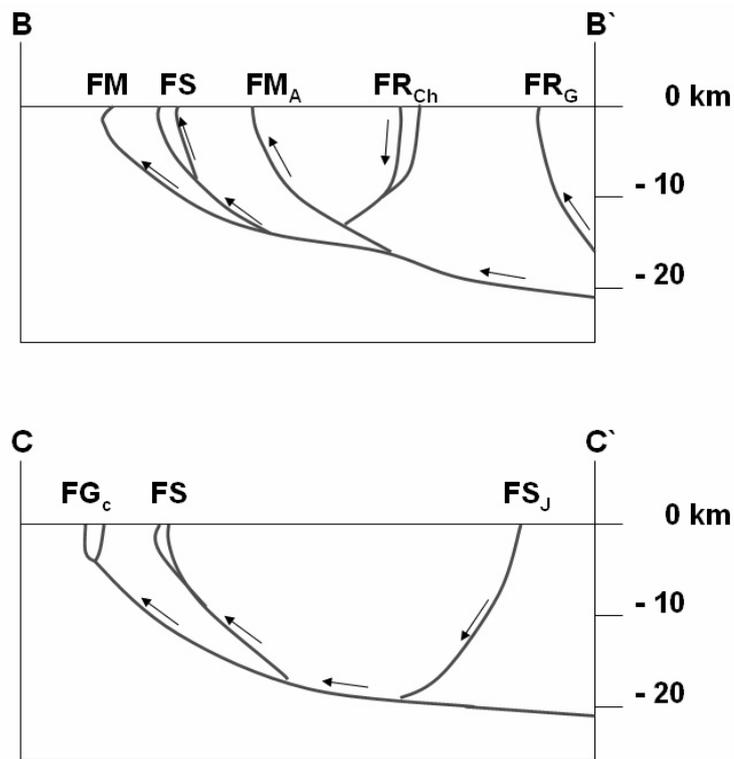


FIGURA 4. Perfiles A – A', B – B', y C – C', indicados en la Figura 3. FG_c: Falla Guaicaramo; FG_v: Falla Guayuriba; FM: Falla Mirador; FM_A: Falla Manzanares; FR_{Ch}: Falla Río Chiquito; FR_G: Falla Gallo; FS: Falla Servitá; FS_J: Falla San Juanito. De acuerdo a estos perfiles, que salvo A – A', el cual tiene poca información geológica pre – existente y es muy especulativo para su geometría tal como se muestra aquí, el estilo tectónico de estas fallas es el de cabalgamientos supeditados a fallas extensionales lítricas que sufrieron un proceso de inversión tectónica desarrollada durante las dos fases de acortamiento que sufrieron los Andes del Norte durante el Cenozoico.

1996; París et al., 2000), hacia el Sur, son el límite de la acreción Proterozoica en el basamento (FIGURAS 3 y 4). En síntesis, estas estructuras han definido los planos en profundidad de los posibles límites de la acreción, y se expresan como fallas con vergencia hacia el Este, con alto ángulo hacia superficie pero que a medida que profundizan bajan su ángulo hasta ser casi planas (Mora et al., 2006). Sin embargo, los planos principales de la acreción es muy posible que sufrieran varias reactivaciones posteriormente. Las sucesivas discordancias que desde el punto de vista estratigráfico se observan en el flanco oriental de la Cordillera Oriental, son prueba de ello. Al menos una discordancia se observa entre el basamento y las metasedimentitas Ordovícico – Silúricas del Complejo Quetame. Igualmente se observa otra discordancia entre las rocas de Complejo Farallones que cubren el lapso Devonico Tardío – Carbonífero con las rocas del Complejo Quetame, y por último otra discordancia entre las rocas del Complejo Farallones con las rocas sedimentarias del lapso Jurásico Tardío – inicios del Cretáceo Temprano. Los depósitos sedimentarios de este último lapso surgen debido a un período extensional Mesozoico que resultó quizás de un efecto sinorogénico que se manifestó principalmente durante

el Cretáceo Inferior en los Andes del Norte. El resultado de esta fase extensional, genera en muchos de los planos fundamentales del basamento reactivación, en la cual sufren una inversión tectónica negativa y da lugar igualmente 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, y 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 presenta en la esquina NW de Suramérica durante el Terciario, tanto para el Paleógeno y que da origen a la discordancia del Eoceno Medio, como para el Plioceno, del que deriva el estilo estructural observado hoy en día en este sector de la Cordillera Oriental (FIGURA 5).

La disposición geotectónica actual de las rocas que componen el sector estudiado comprende una zona de colisión, que está delineada por el frente de cabalgamiento de las Fallas Guaicaramo y Servita hacia el Oriente del sector en límites con los Llanos. Estas fallas se clasifican como fallas cabalgantes (FIGURAS 3 y 4),

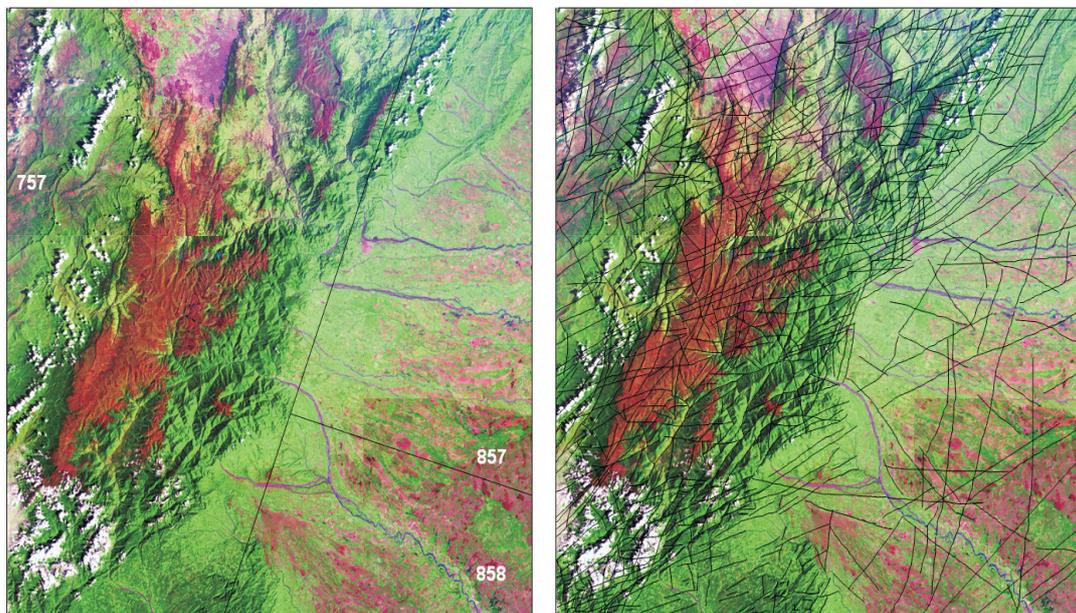


FIGURA 5. Imágenes LANDSAT 5 TM, aplicadas en la caracterización morfo – estructural de este estudio a la izquierda, con la interpretación y delineación de los rasgos tectónicos a nivel regional a la derecha.

con carácter lístrico que definen estructuras plegadas en el medio dúctil siguiendo una propagación de estos 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 el frente de apoyo de la deformación en general (backstop) son las fallas mismas en el basamento el cual es de carácter frágil. El estilo estructural en síntesis es muy similar al de fallas de cabalgamiento en cuencas extensionales en fase de inversión tectónica (McKlay, 1997). Al ser las Fallas Guaicaramo, Mirador, Servitá y Guayuriba – Guaicaramo al sur, los principales elementos estructurales en este sector del piedemonte llanero, la sismicidad intraplaca registrada se debe al accionar de estos planos lístricos en profundidad.

METODOLOGÍA

El estudio preliminar sismotectónico de este sector a un nivel regional, se llevo a partir de una fase inicial de reconocimiento de los principales elementos

estructurales con la determinación de lineamientos tectónicos que derivaron de las imágenes LANDSAT 5 TM Path- Roll 7 - 57, 8 - 57 y 8 – 58 (FIGURA 5), y la ayuda en algunos casos de aerofotografías. Las imágenes fueron corregidas geométricamente para eliminar sus distorsiones mediante la aplicación del programa ERDAS Imagine en busca de referirlas al sistema de proyección cartográfica Universal Transverse Mercator (UTM) / Word Geodetic System 1984 (WGS84), a las cuales se realizo una inspección de bandas y la escogencia de su combinación más optima para una mejor determinación de los rasgos geomorfológicos, estructuras y otras características reconocibles para conseguir determinar de manera optima los rasgos estructurales que permitieron inferir fallas y fracturación en superficie siguiendo las propuestas metodológicas de Scanvik (1989). Posteriormente se siguieron los criterios fotogeológicos y la determinación de plegamientos en los orogenos derivados del análisis de aspectos geomorfológicos según Van Zuidam (1986), y estructurales según McKlay (1997). Según Scandik (1989), uno de los criterios seguidos para la determinación de fallas y lineamientos relacionados a fracturación en la aplicación de las imágenes LANDSAT tanto para bandas individuales como compuestas en el

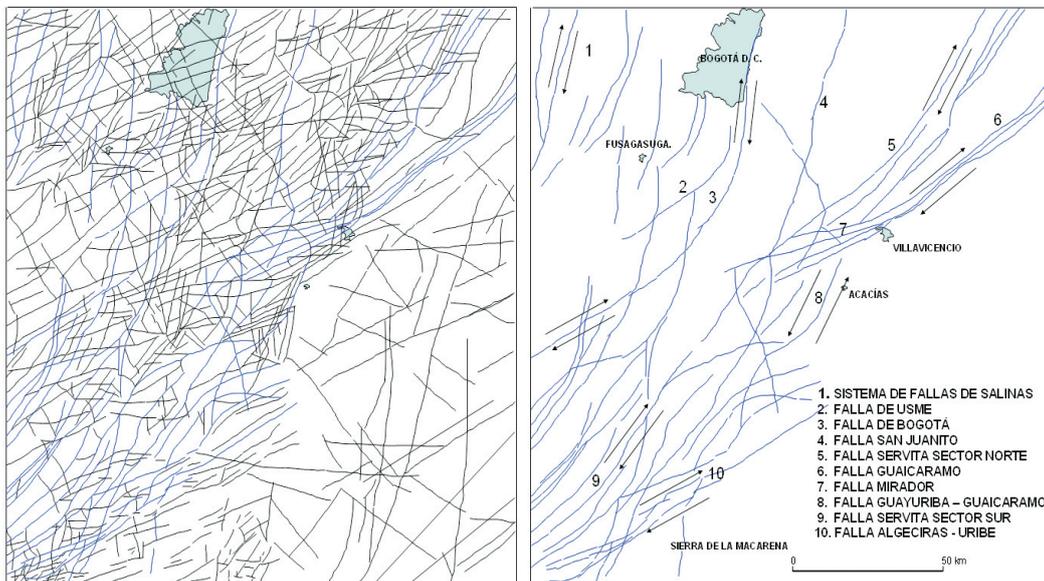


FIGURA 6. Mapa general de lineamientos tectónicos a la izquierda, y resultado de la interpretación con los lineamientos que demarcan los principales sistemas de falla potencialmente activos de la región de estudio a la derecha.

infrarrojo cercano en combinaciones 4 5 2 y 4 5 7, son sus patrones lineares, la interrupción de la topografía y las discontinuidades en los patrones de la cobertura vegetal. Los lineamientos más largos agrupan en su trazado diversos elementos casi esencialmente de naturaleza estructural como fallas, contactos geológicos, estructuras plegadas, paleorelieves y en gran escala a anomalías geofísicas. Una vez mejorada la calidad de visualización de las imágenes, se procedió a realizar la verificación de curvas de nivel en planchas topográficas IGAC disponibles a escalas que oscilan entre 1:500000 y 1:100000 con la detección y caracterización de rasgos geomorfológicos relacionados a los resultados deducidos de las imágenes LANDSAT – 5 TM mediante filtrados y con alto contraste. En algunos casos se presentaron inconvenientes asociados al reconocimiento del terreno con la imagen debido a la alta nubosidad, lo cual fue apoyado con mosaicos que además de emplear las imágenes tradicionales en combinación 742 también incluye imágenes LANDSAT – 7 ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) previamente procesadas en infrarrojo de onda corta (SWIR) con idéntica combinación y que pertenecen al proyecto GeoCover® Landsat desarrollado por la NASA que las ofrece al dominio público vía Internet en formato imagen a color MrSID (NASA, 2003) con resolución de 24 bits para los colores, alcanzando detalles para una escala 1:100000 y que permiten una mejor interpretación fotogeológica. Como resultado de estas observaciones se realizó aquí un mapa de lineamientos (FIGURA 5). Junto con las imágenes y en comparación con las planchas topográficas publicadas por el IGAC se hizo uso también del modelo de elevación digital global GTOPO30 (USGS, 1998) que sirvió de apoyo para el reconocimiento a nivel regional de los grandes rasgos geomorfológicos de la Cordillera Oriental (FIGURA 3). La combinación de los rasgos que involucran sospechosamente a grandes fallas activas que con base en los criterios generales en la geomorfología tectónica de Burbank y Anderson (2001), desde un punto de vista muy regional queda plasmada como resultado en la FIGURA 6.

La información sismológica empleada en este trabajo comprende datos históricos y datos instrumentales. La información macrosísmica procede del catálogo realizado por Ramírez (1975) y la compilación derivada de este plasmada en el proyecto SISRA (NEIC, 2000) y el catálogo del CERESIS (2003), que

cubren en la región de estudio desde 1849 hasta 2005 (FIGURA 7). Los eventos seleccionados aquí cumplen con $3, 1 \text{ km} < h < 460 \text{ km}$, y $3,5 < M_s < 6,0$.

A los datos del catálogo del SISRA con magnitudes de superficie (M_s) y el de la RSNC cuyas magnitudes son locales (M_L), se les ejecuto una localización espacio – temporal, específicamente para la sismicidad intraplaca basándose en el programa ZMAP (Wyss et al., 2001), pero hay que tener presente que aunque los catálogos histórico y de la RSNC (FIGURA 7), reportan sismicidad intraplaca con $h < 60 \text{ km}$, dicha información debe ser interpretada con mucha precaución debido a los errores en la localización desde el punto de vista de la macrosísmica, y a que la información de la RSNC no se encuentra cubierta por el número de estaciones adecuado para la región del Piedemonte Llanero para que garantice un buen gap y el error asociado en la determinación de la profundidad del foco es muy alto en este caso (Gómez y Salcedo, 2000).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este trabajo se determinó que desde 1616 en este sector del Piedemonte Llanero han ocurrido 13 sismos históricos con $M_s > 4,0$ (TABLA 1). Sin embargo se observa que la información relacionada a la profundidad focal es muy escasa en el catálogo.

Aquí se encontró que la distribución de los hipocentros fue bastante diferente en el mapa de distribución de la sismicidad histórica y en el del registro instrumental correspondiente al periodo 1993 – 2001 de la RSNC INGEOMINAS (2001). En estos se observa coincidencia con respecto a sismicidad somera en los alrededores del área metropolitana de Bogotá (FIGURA 7), pero en el caso de la sismicidad instrumental, en general la interpretación que debe darse a este catálogo es simplemente de que muestra las regiones que probablemente tengan mayor actividad sísmica, pero con esta información es imposible distinguir la conducta de un plano de falla a nivel individual debido a las limitaciones de la red sismológica con respecto al número de estaciones que posee el cual es muy poco para poder cumplir con este propósito (Gómez y Salcedo, 2000).

En general estos mapas son bastante diferentes tanto en la localización como en la profundidad focal, y con

esta información hay que ser cauteloso. Desde el punto de vista de la sismicidad histórica, si bien se ha tratado de relacionar a planos de falla reconocidos activos con los sismos históricos (Espinosa, 2004; Cifuentes et al, 2006), estos aun no son precisos tal como se pudiera desear debido a las limitaciones del poblamiento durante la historia de esta región y la falta de registros documentales precisos, y esto explica el porque de la ocurrencia de los sismos de Bogotá en el sentido histórico y el muy poco reporte para el SFFFCO en este sentido para la región del Piedemonte Llanero y los Llanos.

La actividad sísmica del Piedemonte Llanero en síntesis tomando como referencia estas fuentes, es bastante moderada hacia el sector sur de los 4° N, pero en macrosísmica no hay información clara de sismicidad somera para este sector. El reporte preliminar de la RSNC con la aparente someridad de los focos respecto a eventos con magnitudes $M_L \leq 3,0$, hace posible relacionarla con los Sistema de Fallas de Guayuriba – Guaicaramo y la Falla Servitá en su

sector sur, igualmente el Sistema de Fallas Algeciras – Uribe puede también contribuir en este sector con la sismicidad. Al norte de esta latitud la sismicidad es muy baja pero igualmente su profundidad no es clara con los reportes de ambas fuentes, y es muy posible que los pocos eventos que aparecen en este sector con profundidad < a 40 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 lítricas 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 preliminar indicaría que los sismos intraplaca en esta región están relacionados a la respuesta de esfuerzos derivada de los cabalgamientos activos del SFFFCO, en donde los esfuerzos se liberan a través de los planos de falla en profundidades que oscilan entre 5 y quizás hasta más de 30 km. Hacia el occidente de Bogotá, y hacia el flanco occidental de la Cordillera se observa en ambos reportes sismicidad de diferentes profundidades igualmente moderada y responde a la actividad

TABLA 1. Sismos históricos ocurridos en la región que contempla este estudio, conforme los catálogos del SISRA y CERESIS. La determinación del sismo del 19 de enero de 1995, es tomada del NEIC.

EVENTO	FECHA	LONGITUD	LATITUD	Ms	h	REFERENCIA
1	? - 02 - 1616	-74,00	5,00	7,0	?	SISRA
2	16 - 03 - 1644	-74,00	4,50	7,0	?	SISRA
3	18 - 10 - 1743	-73,80	4,50	6,5	?	CERESIS
4	12 - 07 - 1785	-73,80	4,70	6,5	?	CERESIS
5	19 - 11 - 1814	-74,00	4,60	4,5	?	CERESIS
6	18 - 06 - 1826	-73,90	4,80	7,0	?	CERESIS
7	08 - 08 - 1903	-74,00	4,60	4,5	?	CERESIS
8	31 - 08 - 1917	-74,00	4,00	7,3	47 +/- 15**	CERESIS
9	22 - 12 - 1923	-73,20	5,50	5,5	?	CERESIS
10	02 - 07 - 1950	-73,50	4,00	6,0	?	CERESIS
11	04 - 09 - 1966	-73,96	4,55	4,9	8	CERESIS
12	18 - 10 - 1966	-74,20	3,64	4,3	40	CERESIS
13	21 - 11 - 1979	-74,73	4,54	3,6	33	CERESIS
14	19 - 01 - 1995	-72,95	5,00	6,9	22 +/- 3**	NEIC

* Gómez y Salcedo, 2000, Profundidad Macrosísmica según modelo de Blake - Shebalin

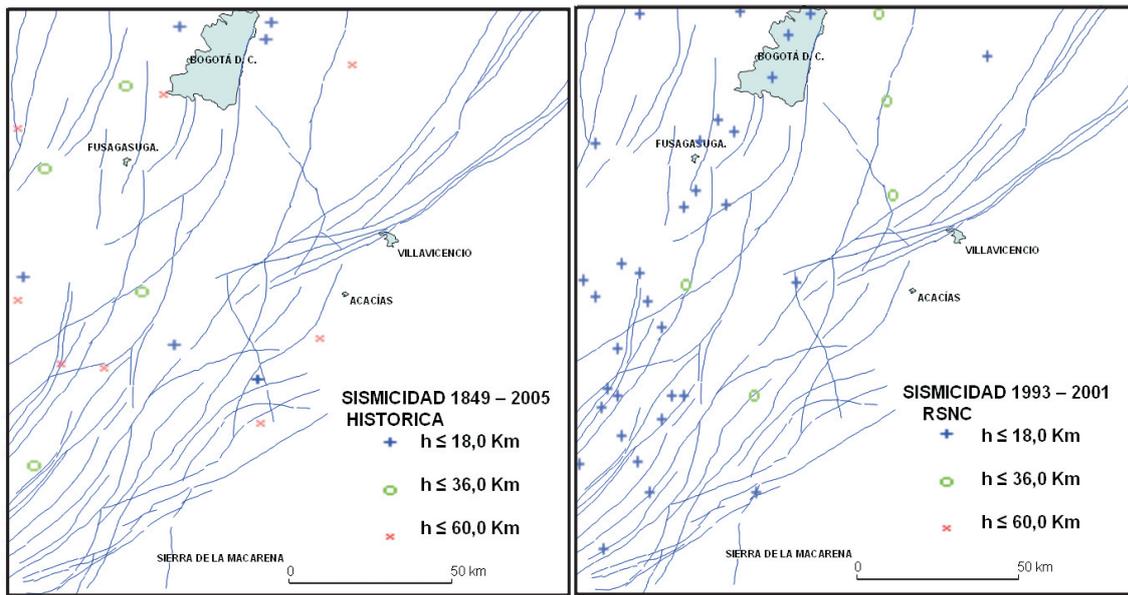


FIGURA 7. Mapas sismotectónicos generales para $h \leq 60$ km con $M_s \geq 4,0$ a partir de la información macrosísmica y del NEIC para el lapso 1849 – 2005 a la izquierda, y del registro instrumental de la RSNC período 1993 - 2001 con $M_L \geq 2,5$ a la derecha.

del Sistema de las Fallas de Salinas como la Falla de Buitima y la de El Alto del Trigo (París et al, 2000).

La sismicidad intraplaca en este sector del Piedemonte Llanero colombiano obedece principalmente a la actividad de planos cabalgantes que conforman el frente orogénico en que se emplaza el SFFFCO, y la sismicidad en este modelo estructural (FIGURAS 3, 4 y 8), se relaciona al tipo de de cabalgamiento con una componente lateral, que para el SFFFCO se ha verificado por estudios previos (París et al., 2000), como derecha. Escenarios tectónicos con fuerte actividad sísmica en los Andes relacionada a este mecanismo de fallas se presentan en los Andes Centrales entre la Precordillera y las Sierras Pampeanas en Argentina (Costa et al., 2006), al igual que del mismo modo se ha reportado sismicidad en el Piedemonte Llanero Venezolano, correspondiente al flanco suroriental de la Cordillera de Merida en la Falla del Piedemonte Oriental (Audemard, 2003). Salvo la Falla Algeciras, la cual está definida como una estructura rumbo deslizante, con importante componente lateral derecha que sirve de límite de la transpresión entre los Andes del Norte y la Placa Suramericana (Vergara, 1996; Velandia et al., 2001, Velandia y Montes, 2005), las

estructuras como las Fallas de Guaicaramo, Guayuriba, Mirador y Servitá son fallas de cabalgamiento con componente lateral derecha (FIGURA 8), y a su vez cumplen con este papel en el sector de estudio contemplado aquí. La falla Guaicaramo continua con idéntico estilo estructural y rol de falla fundamental hacia el norte de este sector en el Departamento de Casanare (Colletta et al., 1990; Roeder y Chamberlain, 1995; Mora et al., 2006). En este último sector este plano de falla fue el responsable del sismo del 19 de enero de 1995, con $M_s = 6,9$, y su mecanismo focal resultó ser de carácter inverso (París et al, 2000; Dimate et al, 2003). El campo de esfuerzos imperante (FIGURA 8), responsable de la movilidad y contracción litosférica en la Cordillera Oriental para el sector al norte de la latitud 4° N, se ha determinado mediante resultados de microtectónica previos para planos de falla que presentan rumbos NNE que obedece a un σ_1 con una tendencia NW – SE con componente sub – horizontal (Vergara et al, 1996; Taboada et al, 2000; Cortés et al., 2005). Este campo de esfuerzos deriva de la evolución de la acreción del Bloque Costa Rica - Panamá – Choco (BCRPC) junto con el ajuste final de la Placa Caribe en el margen noroccidental de Suramérica durante el lapso Plioceno – Pleistoceno, efecto geodinámico que aun se

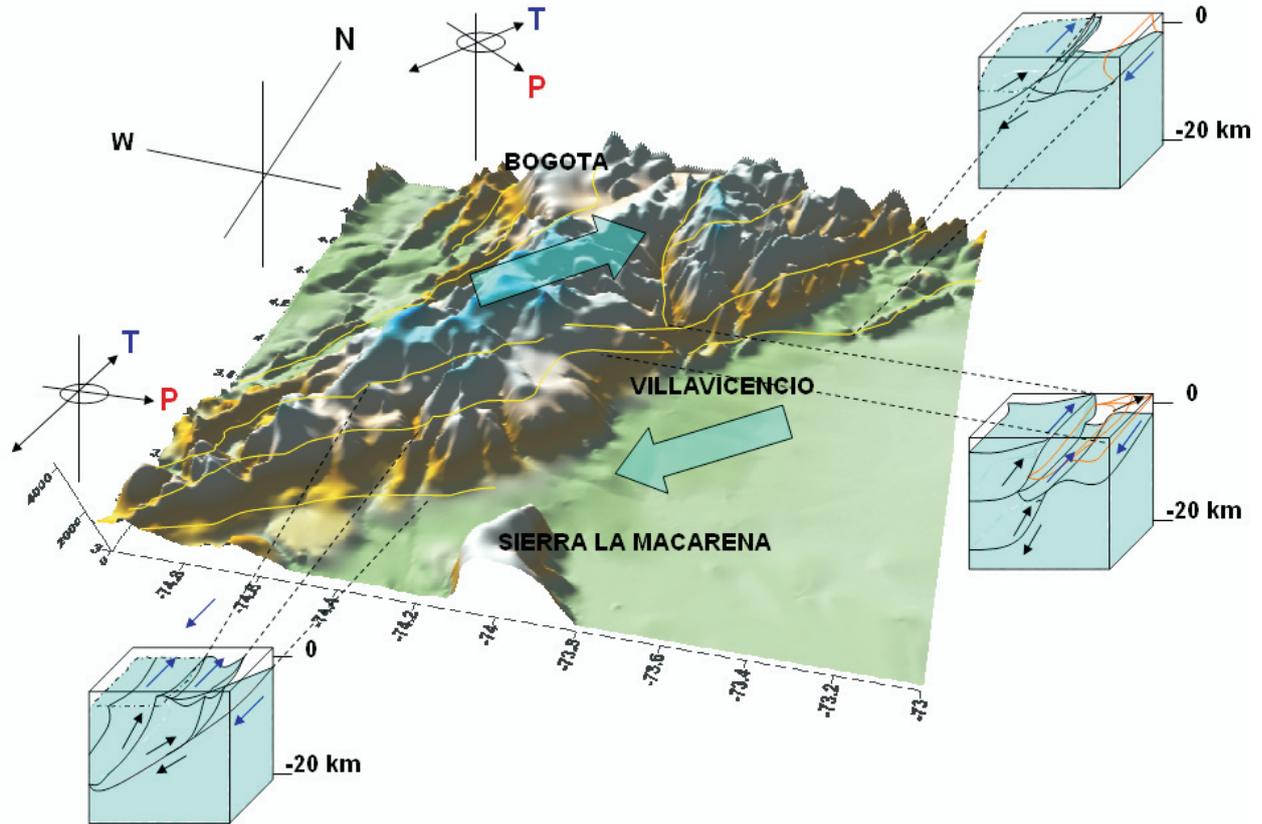


FIGURA 8. DTM que muestra los campos de esfuerzos predominantes para el sector central de la Cordillera Oriental (P: Compresión, T. Extensión), y las principales tendencias cinemáticas en 3D como respuesta a este efecto tectónico en tres diferentes sectores del SFFFCO, exhibidos en los cubo diagrama. La respuesta sísmológica a la liberación de esfuerzos se concentra en los planos cabalgantes que sirven de límite entre el basamento Meso - Proterozoico Andino (Basamento cabalgante), con el Escudo de Guyana. Estos basamentos representan un ambiente frágil (En color aguamarina en los cubos), favorable para ocurrencia de sísmos de magnitud superior a 5,0 con predominio de mecanismo focal inverso y rumbo lateral derecho, resultado de desgarrar por la compresión a que está sometido este sector orogénico en el Presente.

encuentra activo en el Presente y que ejerce un papel decisivo en la configuración del estilo orogénico actual de los Andes del Norte (Chicangana y Vargas, 2005). Igualmente este desplazamiento de placas verificado desde puntos de referencia con la aplicación de GPS como Bogotá y Villavicencio (Trenkamp et al, 2002), muestran la alta movilidad que existe en la Cordillera Oriental con respecto a la placa rígida suramericana, y aquí entra en juego la componente dextro lateral del plano fundamental del SFFFCO que es la Falla de Guaicaramo límite entre los ambientes frágiles del basamento (FIGURA 8). Al sur de esta latitud, σ_1 cambia su dirección y el campo que se define en sentido E – W señala que el efecto de la colisión del BCRPC disminuye y se incrementa el de la subducción de la placa de Nazca al Oeste.

La liberación de esfuerzos en los planos cabalgantes que conforman el SFFFCO en la región de estudio, es bastante similar desde el punto de vista sísmológico al definido en Argentina para la Falla La Laja en la Precordillera Oriental, la cual fue la responsable del Terremoto con $M_s = 7,4$ que afectó la ciudad de San Juan en enero de 1944 (Perucca y Paredes, 2003; Meigs et al, 2006). La longitud máxima de ruptura de la Falla La Laja fue de 8 km con un desplazamiento vertical máximo de 0,60 cm. Sin embargo Perucca y Paredes (2003), encuentran por evidencia de campo, una serie de rupturas históricas que señalan que el sísmo no se produjo en un solo plano de falla sino en 4 planos seudo paralelos que conforman la zona fallada que dio lugar al sísmo. Igualmente estos autores luego de encontrar esta situación, recomiendan realizar una sumatoria de

la longitud de ruptura máxima probable resultante en los planos involucrados durante el evento, para cuantificar la longitud de ruptura total del sismo. Este modelo tectónico indica que no necesariamente se requiere un solo plano de falla para liberar un sismo en un ambiente tectónico como el de la Precordillera en Argentina, o en el Piedemonte Llanero colombiano como en nuestro sector de estudio. Cartografía a escala 1:100000, como la realizada por Pulido y Gómez (2001) para el sector de Villavicencio lo dejan claro en este sentido, con el seccionamiento de los planos de falla de las Fallas Mirador y Servitá, las cuales igualmente presentan muchos planos casi paralelos, revelándolos como planos de cabalgamiento. Este escenario también se muestra con el mapa general de lineamientos tectónicos realizado aquí (FIGURAS 5 y 6). Igualmente la relativa proximidad del basamento (Mora et al, 2006), y las evidencias neotectónicas y de actividad morfo tectónica actual puestas en evidencia en campo tanto en un contexto general en la Precordillera y la zona de la Falla La Laja en Argentina (Meigs et al, 2006), como en el Piedemonte Llanero colombiano (Robertson, 1989, 2005; Vergara et al., 1996; París et al, 2000, López, 2005), el cual presenta rasgos más complejos en este sentido que en los Andes Centrales en Argentina (Diederix, H. com. pers.), hacen estimar que estos planos de falla son altamente activos y son propensos a liberar sismos con gran magnitud ($M \geq 6,0$), ya sea de manera individual o colectiva como el caso argentino. Este fenómeno se presentó para el sismo de Tauramena de 1995, en el plano de la Falla de Guaicaramo, ya que durante el estudio del proceso de replica se observó que la sismicidad se concentró en dos planos antitéticos y no en un solo plano (Dimate et al, 2003). La baja sismicidad de la zona en que se presentó el sismo de enero de 1995, es coincidente con el comportamiento en el sentido tiempo determinado aquí para el norte de los 4° N. Este aparente silencio sísmico, el cual abarca una longitud de cerca de 100 km a lo largo del SFFFCO en este sector, con sus evidencias contundentes de actividad neotectónica, debe incentivar estudios sismológicos y paleosismológicos sobre algunos de sus planos de falla, que ayuden a encontrar estimaciones de sus tasas de sismicidad y su magnitud máxima probable, para poder valorar con certeza su amenaza sísmica.

CONCLUSIONES

EL SFFFCO entre los 3° y 5° N, se caracteriza por presentar planos de cabalgamiento, de los cuales la Falla de Guaicaramo tiene un papel de límite fundamental entre el bloque Andino y la placa suramericana. El sistema de fallas deriva de la reactivación de antiguos planos compuestos por fallas inicialmente inversas y de cabalgamiento que se originaron en el basamento como resultado de la colisión de un paleoprisma continental durante la acreción continental Meso – Proterozoica entre Laurentia y el Cratón Amazónico. Durante el lapso Jurásico – Cretáceo estos planos se reactivaron en una fase de inversión tectónica negativa y dio lugar del mismo modo a la aparición de nuevos planos como fallas normales en la cobertera Fanerozoica inicial (Paleozoico), resultado de un régimen extensivo tras arco sinorogénico, el cual modeló la estructuración de la cobertera Fanerozoica dando origen a pequeñas cuencas intracontinentales durante el transcurso de Cretáceo. Durante el Terciario como resultado de dos episodios de inversión tectónica positiva, estas fallas se reactivaron generando fallamiento inverso e igualmente sirvieron de planos de despegue del basamento Andino, que como resultado de la contracción litosférica lo conllevaron a cabalgar sobre la placa suramericana. Durante la última fase de la inversión tectónica resultado del ajuste final en la convergencia de las placas en la esquina noroccidental de Suramérica en el lapso Plioceno - Presente, se observa una fuerte contracción litosférica, la cual dio origen a la modelación orogénica y el estilo tectónico predominante en el Presente en este sector. De esta última situación se destaca una baja actividad sísmica entre los 4° N y los 5° N, y una actividad sísmica moderada al sur de esta latitud hasta los 3° N. Planos de falla cabalgantes por parte del SFFFCO que se extienden en el basamento quizás hasta a un nivel sublitosférico con un bajo ángulo como la Falla de Guaicaramo principalmente, son los candidatos potenciales de producir sismos someros con una magnitud $M \geq 6,0$, contribuyendo de esta manera a la amenaza sísmica de las ciudades de Bogotá y Villavicencio, pero la falta de información sismológica en el sentido paleosismológico, histórico e instrumental han sido el inconveniente por el momento para estimar sus períodos intersísmicos y conseguir calcular la magnitud máxima probable a cada plano en particular.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio el cual es preliminar, es solo la primera parte de un estudio más ambicioso que trata de estimar la amenaza sísmica de las ciudades de Bogotá y Villavicencio por parte del SFFFCO. Los autores hacemos aquí un reconocimiento a las autoridades de la Corporación Universitaria del Meta y a los historiadores Nancy Espinel Riveros y Jairo Ruiz Churión en la ciudad de Villavicencio por su apoyo y colaboración para la realización de este trabajo, e igualmente al Grupo de Geofísica del Departamento de Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.

REFERENCIAS

AIS - INGEOMINAS (1996). Estudio General de Amenaza Sísmica en Colombia. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica – INGEOMINAS – Universidad de los Andes, Bogotá. 252 p.

Burbank, D. W. y Anderson, R. S. (2001). Tectonic Geomorphology. Blackwell, 274p.

Audemard, F. A. (2003). Geomorphic and geologic evidence of ongoing uplift and deformation in the Mérida Andes, Venezuela. Quaternary International, Vol. 101-102, pp 43 – 65.

CERESIS (2003). Intensidades Colombia, Centro Regional de Sismología para América del Sur (1985), “Catalogo de terremotos para América del Sur. Programa para la Mitigación de los efectos de los terremotos en la región andina, Proyecto SISRA, v. 1- 9, Editado por B. Askew y S. T. Algermissen, Programa de Capacitación en Desastres y Sismología por Internet: www.ceresis.org/cursos/Ipaises/intensidades

Chicangana, G. y Vargas, C. A. (2006). Evolución del estilo orogénico actual de los Andes del norte: Resultado de la acreción del Bloque Costa Rica – Panamá – Chocó (BCRPC) durante el Plioceno Superior. Memorias del II Congreso Latinoamericano de Sismología, En CD – Room.

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.

Colletta, B. Hebrard, F., Letuzey, J. Werner, P. y Rudkiewicz, J. L. (1990). Tectonic style and crustal structure of the Eastern Cordillera (Colombia) from a balanced cross section. *Petroleum and Tectonics in Mobile belts*. Technip, Paris, pp. 81 – 100.

Cortes, M., Angelier, J. y Colletta, B. (2005). Paleostress evolution of the northern Andes (Eastern Cordillera of Colombia): Implications on plate kinematics of the South Caribbean region. *Tectonics*, Vol. 24, TC1008, doi: 10.1029/2003TC001551.

Costa, C. H., Gardini, C. E., Diederix, H., Cisneros, H. A., y Ahumada, E. A. (2006). The Active Andean Orogenic Front at the Southernmost Pampean Flat-Slab. In: *Backbone of the Americas: Patagonia to Alaska*: http://gsa.confex.com/gsa/06boa/finalprogram/abstract_100389htm

Dimate, C., Rivera, L., Taboada, A., Delouis, B., Osorio, J. A., Jimenez, E., Fuenzalida, A., Cisternas, A. y Gomez, I. (2003). The 19 January 1995 Tauramena (Colombia) earthquake: geometry and stress regime. *Tectonophysics*, Vol. 363, N° 3 -4, pp. 159 – 180.

Duncan Keppie, J., Dostal, J., Ortega – Gutierrez, F. y Lopez, R. 2001; A Grenvillian arc on the margin of Amazonia: evidence from the southern Oaxacan Complex, southern Mexico. *Precambrian Research*, Vol. 112, pp. 165 – 181.

Duncan Keppie, J., Damian Nance, R., Brendan Murphy, J. y Dostal, J. (2003). Tethyan, Mediterranean, and Pacific analogues for the Neoproterozoic – Paleozoic birth and development of peri – Gondwanaland terranes and their transfer to Laurentia and Laurussia: *Tectonophysics*, Vol. 365, pp. 195 – 219.

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, pp. 12 – 16.

Hernández, G. R. (1996). Bases georeferenciadas para el análisis estructural del Piedemonte Llanero. *Memorias del VII Congreso Colombiano de Geología*, Vol. II, pp. 391 – 399.

INGEOMINAS (2001). Boletín de Sismos 1993 –2001. INGEOMINAS - RSNC.

INGEOMINAS (2002). Atlas Colombiano de Información Geológica - Minera para la Inversión, ACIGEMI, Versión 1.0. Beta.

Kroonenberg, S. B. (2000). La Colisión Continental entre Amazonía y Laurentia 1100 Ma atrás: Coloquio sobre el Precámbrico de Colombia, Ingeominas, Resumen conferencia técnica: www.ingeominas.gov.co/colloquio.html

Maya, M. (2001). Distribución, facies y edad de las rocas metamórficas de Colombia: *Ingeominas*, I – 2426, 57 p.

McClay, K. R. (1997). *Sipetrol Short Course*: K. R. McClay, 313p.

Meigs, A., Krugh, W. C., Schiffman, C., Verges, J. M., y Ramos, V. A. (2006). Refolding of Thin-Skinned Thrust Sheets by Active Basement-

- Involved Thrust Faults in the Eastern Precordillera Of Western Argentina. In: Backbone of the Americas: Patagonia to Alaska: http://gsa.confex.com/gsa/06boa/finalprogram/abstract_101160htm
- 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, No. 2, TC2010 Doi:10.1029/2005TC001854
- NASA (2003). GeoCover™, Orthorectified Landsat Thematic Mapper Mosaics: Earthsat MrSID Coverage. <http://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid>
- NEIC (2000). 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://wwwneic.cr.usgs.gov/neic/epic/code_catalog.html;
- Also: http://gldss7.cr.usgs.gov/neis/epic/code_catalog.html or <http://seismo.ethz.ch/gshap/ceresis/ceresi91.dat>
- Noble, S.R., Aspden, J.A. & Jemielita, R. (1997). Northern Andean crustal evolution: New U - Pb Geochronological constraints from Ecuador: *GSA Bull* 109, 789-798.
- París, G., Machette, R., Dart, R. L. and Haller, K. M. (2000). Database and Map of Quaternary faults and folds of Colombia and its offshore regions, Open – File Report 00 – 0284: <http://www.pubs.usgs.gov/of/2003/opf-00-0284>.
- Perucca, L. P. y Paredes, J. (2003). Fallamiento Cuaternario en la zona de La Laja y su relación con el terremoto de 1944, Departamento de Albardón, San Juan, Argentina. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Vol. 20, Nº 1, pp. 20 – 26.
- Prössl, K. F. y Grösser, J. R. (1990). Some new palynomorphs from the Silurian of the Quetame Massif, Cordillera Oriental, Colombia, South America: *INGEOMINAS, Bol. Geol.* Vol. 34, Nº 2 -3, pp. 27 – 38.
- Pulido, G. O. y Gómez, V. L. S. (2001). Geología de la Plancha 266 Villavicencio. Ingeominas, Mapa a escala 1:100000 y Memoria. 50 p.
- Ramirez, J. E. (1975). Historia de los Terremotos en Colombia, IGAC, 250p.
- Restrepo, P. A. (1995). Late Precambrian to early Mesozoic tectonic evolution of the colombian Andes, based on new geochronological, geochemical and isotopic data: Unp. PhD thesis, University of Arizona, 195 p.
- Robertson, K. (1989). Actividad Neotectónica del Piedemonte de la Cordillera Oriental. *Memorias del V Congreso Colombiano de Geología*, Vol.1, pp. 170 – 192.
- Robertson, K. (2005). Morfotectónica y dataciones del fallamiento activo del Piedemonte Llanero, Colombia. *Memorias del X Congreso Colombiano de Geología*, En CD – Room.
- Roeder, D. y Chamberlain, R. L. 1995; Eastern Cordillera of Colombia: Jurassic – Neogene Crustal Evolution, In: A. J. Tankard, R. Suarez S., and H. J. Welsink, Petroleum basins of South America, AAPG Memoir, Nº 62, pp. 633 – 645.
- Scanvic, J – Y. (1989). Teledetección aplicada: Madrid, Paraninfo, 198 p.
- Taboada, A., Rivera, L. A., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Philip, H., Bijwaard, H., Olaya, J. y Rivera, C. (2000). Geodynamics of the northern Andes: Subduction and intracontinental deformation (Colombia): *Tectonics*, Vol. 19, Nº 5, pp. 787 – 813.
- Trenkamp, R., Kellogg, J. N., Freymueller, J. T. y Mora, H. (2002). Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations. *Journal South American. Earth Sciences*, Vol. 15, pp. 157 – 171.
- USGS (1998). GTOPO30, Global Digitally Model Elevation: http://LPDAAC.usgs.gov/gtopo30/faq_gtopo30.asp
- Van ZUIDAM, R. A. (1986). Aerial Photo – Interpretation in Terrain Análisis and Geomorphologic Mapping: Smits Pub., The Hague, 442 p.
- Velandia, P. F., Terraza, M. R. y Villegas, V. H. (2001). El Sistema de Fallas de Algeciras hacia el suroeste de Colombia y la actual transgresión de los Andes del Norte. *Memorias del VIII Congreso Colombiano de Geología*, En CD – Room.
- Velandia, F. y Montes, N. (2005). Actividad Neotectónica del Sistema de Fallas de Algeciras, en el departamento del Huila, Colombia. *Memorias del X Congreso Colombiano de Geología*, En CD – Room.
- Vergara, H. S. (1996). Rasgos y actividad neotectónica de la Falla de Algeciras. *Memorias del VII Congreso Colombiano de Geología*, Vol. I, pp. 491 – 500.
- Vergara, H. S., Taboada, A., Romero, J., Castro, E. y París, G. (1996). Actividad neotectónica de las principales fuentes sismogénicas de la región central de Colombia. *Memorias del VII Congreso Colombiano de Geología*, Vol. I, pp. 517 – 528.
- Wyss, M., Wiemer, S. y Zuñiga, R. (2001). ZMAP: A Tool for Analyses of Seismicity patterns, Typical Applications and Uses: A Cookbook: <http://www.seismo.ethz.ch/staff/stefan/>

Trabajo recibido: febrero 15 de 2007

Trabajo aceptado: abril 17 de 2007