

La amenaza sísmica de la Sabana de Bogotá frente a un sismo de magnitud $M > 7.0$, cuyo origen esté en el Piedemonte Llanero

Germán Chicangana*

Universidad Santo Tomás, Villavicencio – Colombia

Carlos Alberto Vargas-Jiménez**
Andreas Kammer***

Universidad Nacional de Colombia, Bogotá – Colombia

Alexander Caneva****

Universidad Antonio Nariño, Bogotá – Colombia

Elkin Salcedo Hurtado*****

Universidad del Valle, Cali – Colombia

Augusto Gómez Capera*****

Istituto Nazionale di Geofísica e Vulcanologia, Milano – Italia

Resumen

En este trabajo se muestra cómo un gran sismo originado en el Sistema de Fallas de la Falla Frontal de la Cordillera Oriental (SFFCO) puede causar grandes daños y pérdidas de vidas, tanto en el área metropolitana de Bogotá, D. C., como en el resto de la Sabana de Bogotá. El grado de la amenaza sísmica de la ciudad ante un sismo cercano, originado en el Piedemonte Llanero, cuya distancia es inferior a 250 km y con una magnitud > 7.0 , es muy alto, si se tiene presente que sus suelos, de origen lagunar, se ubican hacia el occidente y el noroccidente, zonas en las que, durante las dos últimas décadas, se ha ido extendiendo el área metropolitana.

Palabras clave: amenaza sísmica, fallas del Piedemonte Llanero, Sabana de Bogotá, suelos lagunares.



DOI: dx.doi.org/10.15446/rcdg.v24n2.43865

RECIBIDO: 5 DE JUNIO DEL 2014. ACEPTADO: 15 DE DICIEMBRE DEL 2014.

Artículo de reflexión sobre el alcance de la amenaza sísmica de la Sabana de Bogotá en los aspectos geológicos, sismológicos y geotécnicos.

COMO CITAR ESTE ARTÍCULO: Chicangana, Germán, Carlos Alberto Vargas-Jiménez, Andreas Kammer, Alexander Caneva, Elkin Salcedo Hurtado y Augusto Gómez Capera. 2015. "La amenaza sísmica de la Sabana de Bogotá frente a un sismo de magnitud $M > 7.0$, cuyo origen esté en el Piedemonte Llanero". *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 24 (2): 73-91. DOI: 10.15446/rcdg.v24n2.50207

* Dirección postal: Sede Campus Aguas Claras, calle 1 con carrera 22 Diagonal Séptima Brigada. Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás, sede Villavicencio.

Correo electrónico: germanchicangana@usantotomas.edu.co; gechicanganam@unal.edu.co

** Dirección postal: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, edificio Manuel Ancízar 224, Departamento de Geociencias, carrera 30 n.º 45-03, Bogotá D. C. A.A. 14490.

Correo electrónico: cavargasj@unal.edu.co

*** Correo electrónico: akammer@unal.edu.co

**** Dirección postal: Dirección Nacional de Investigaciones, Universidad Antonio Nariño, carrera 38 n.º 58 A-37, Bogotá D. C.

Correo electrónico: investigador.geofisica@uan.edu.co

***** Dirección postal: Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroccidente Colombiano, Departamento de Geografía, Universidad del Valle, edificio 384, oficina 4012. Ciudad Universitaria Meléndez, calle 13 n.º 100-00, Cali, Colombia.

Correo electrónico: elsalced@univalle.edu.co

***** Dirección postal: Istituto Nazionale di Geofísica e Vulcanologia – Sezione di Milano, via Bassini 15, 20133 Milano, Italia.

Correo electrónico: antonio.gomez@ingv.it

A ameaça sísmica da Sabana de Bogotá ante um sismo de magnitude $M > 7.0$ cuja origem esteja no Piedemonte Llanero

Resumo

Neste trabalho, mostra-se como um grande sismo originado no Sistema de Falhas da Falha Frontal da Cordilheira Oriental (SFFFCO) pode causar grandes danos e perdas de vidas, tanto na área metropolitana de Bogotá D.C. quanto no restante da Sabana de Bogotá. O grau da ameaça da cidade ante um terremoto próximo, originado no Piedemonte Llanero, cuja distância é inferior a 250 km e com uma magnitude > 7.0 , é muito alto, se for considerado que seus solos lacustres estão em direção do oeste e noroeste, regiões nas quais, durante as duas últimas décadas, vêm sendo estendidas à área metropolitana.

Palavras-chave: ameaça sísmica, falhas do Piedemonte Llanero, Sabana de Bogotá, solos lacustres.

The Seismic Hazard of the Savanna of Bogota with Respect to an Earthquake of Magnitude $M > 7.0$ Originating in the Llanos Foothills

Abstract

This work reveals how a major earthquake originating in the Eastern Frontal Fault System (Sistema de Fallas de la Falla Frontal de la Cordillera Oriental – SFFFCO) can cause great damage and loss of life in both the metropolitan area of Bogota D.C. and the remainder of the Savanna of Bogota. The degree of seismic hazard for the city in the case of a near-field earthquake with a magnitude > 7.0 originating in the Llanos Foothills, less than 250 km away, is extremely high given that soils of lagoon origin are located to the west and northwest of the city, regions where the metropolitan area has extended during the past two decades.

Keywords: seismic hazard, faults of the Llanos Foothills, Savanna of Bogota, lagoon soils.

Introducción

El Piedemonte Llanero colombiano está configurado geomorfológicamente por el Sistema de Fallas de la Falla Frontal de la Cordillera Oriental —en adelante, SFFFCO— que, según Paris y Romero (1994) es el límite entre el bloque andino y la placa suramericana, por lo que es una zona de alta movilidad tectónica debido al empuje que la placa de Nazca, que subduce bajo Suramérica, produce en este sector del continente (figura 1). La actividad tectónica del SFFFCO se manifiesta como la sismicidad superficial que puede llegar a presentar sismos con $M \geq 7.0$. Trabajos previos como el estudio de *Microzonificación sísmica de Bogotá* (Ingeominas y la Universidad de los Andes 1997), y el realizado por el Fondo de Prevención y Atención de Emergencias del Distrito Capital — en adelante, Fopae— (Fopae 2011), por citar algunos, han estimado el alto grado de amenaza sísmica a la que está expuesta el área metropolitana

de Bogotá ante un sismo cercano, cuya ocurrencia, con magnitud $M > 7.0$, produciría en la Sabana de Bogotá una muy fuerte aceleración de sus suelos, debido a que esta se construyó a partir de un lago interandino, que se desarrolló durante el Pleistoceno superior (Helmens y Van der Hammen 1995; Montoya y Reyes 2005; Torres, Vandenbergheand y Hooghiemstra 2004; Van der Hammen y González 1963). En la Sabana de Bogotá los depósitos lagunares se constituyen de sedimentos finos con alta saturación de agua (Ingeominas y Universidad de los Andes 1997). Aquí se entra a definir cuál es el alcance de la ocurrencia de un sismo con $M > 7.0$, y cuál sería la distancia mínima de su epicentro hasta Bogotá, para que este sismo produzca en los suelos que conforman la Sabana de Bogotá, grandes aceleraciones con las cuales se afectarían de manera muy severa las construcciones y estructuras que no cumplan con los requerimientos del *Código colombiano de construcción sismorresistente* o NSR-10.

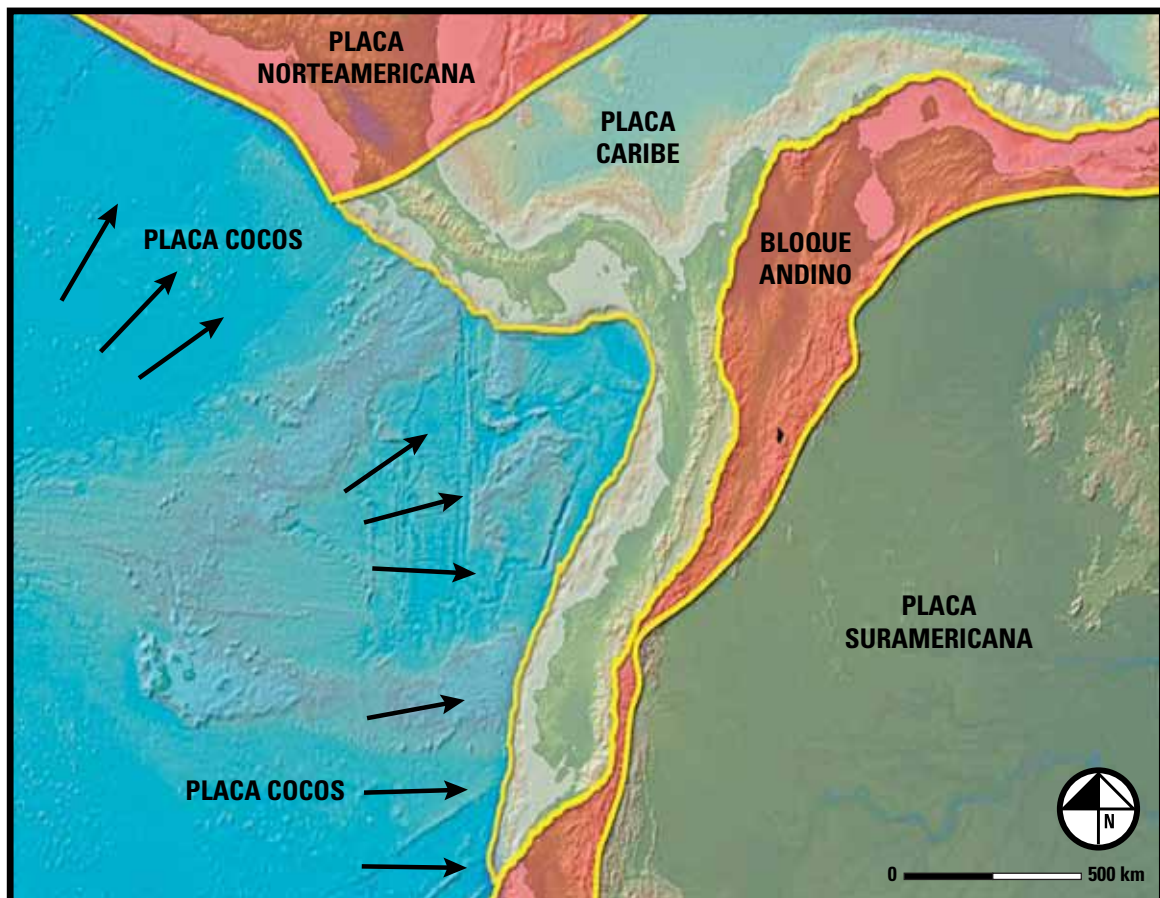


Figura 1. Mapa de las placas que convergen en el noroccidente de Suramérica, tendencias en la convergencia de la placas Cocos y Nazca y localización del área de estudio en el recuadro.

En este trabajo se muestra cómo el SFFFCO es una de las sismofuentes cercanas al área metropolitana de Bogotá, D. C., que contribuyen a que su amenaza sísmica sea categorizada como alta, ante un gran sismo cercano, con $M > 7.0$, originado por dicho sistema de fallas, y su posible ocurrencia, con respecto a la aceleración de sus suelos y al alcance de la amenaza sísmica, produciría coincidencias con lo acaecido en Ciudad de México, en cuanto a los efectos que sufrió por el sismo de 1985.

Metodología

A partir de información secundaria y con verificación propia, en este trabajo se describen, de manera muy general, para determinar en esta región (véase figura 1), su contexto sismotectónico, aspectos geológicos, como la estratigrafía y su marco tectónico. A partir de resultados de investigaciones en el campo de la sismotectónica, a continuación se muestran los sismos relacionados con el SFFFCO, indicando el potencial sismogénico de dicho sistema de fallas y sus alcances ante la amenaza sísmica del centro de Colombia. De la misma manera, se describe la estratigrafía de la Sabana de Bogotá y se pasa a valorar sus parámetros geotécnicos. Una vez efectuado lo cual, se procede a hacer una comparación, en términos geotécnicos, de los efectos esperados por la ocurrencia de un gran sismo cercano para Bogotá D. C., con los acaecidos en el área metropolitana de México D. F., por los efectos del sismo del 19 de septiembre de 1985. Comparación que surge de la inquietud que dejó el estudio de *Microzonificación sísmica de Bogotá*, que realizó Ingeominas y la Universidad de los Andes, en 1993.

Para la época en que se realizó el estudio de *Microzonificación sísmica de Bogotá* no se tenía claridad sobre las sismofuentes que pueden afectar al área metropolitana de Bogotá por un sismo de magnitud superior a 7.0, ya que en ese entonces se tomaron en consideración solo aspectos macrosísmicos resultantes de los sismos de 1785, 1827 y 1917 como los más fuertes sentidos en Bogotá y dejando en segundo término los sismos de 1743, 1826, 1923, 1967 y 1995. Todos estos sismos presentaron intensidades en la Sabana de Bogotá, que variaron entre VII y VIII (Espinosa 2003; Ingeominas y Universidad de los Andes 1997; OSSO 2008; Salcedo y Castaño 2011; Salcedo y Gómez 2013; Sarabia et ál. 2010). Al sismo de noviembre 16 de 1827, en cuya área epicentral su intensidad fue X (Espinosa 2003), se estima que su magnitud fue mayor a 7.0 (Velandia et ál. 2005), ya que en la Sabana de

Bogotá su intensidad no fue menor a VIII (Espinosa 2003). Para Bogotá y las poblaciones de la Sabana de Bogotá, este sismo produjo la destrucción de muchos edificios, destacándose el Palacio de Gobierno, la catedral y otras importantes iglesias (OSSO 2008).

Se debe tener en cuenta que los sismos, sentidos en el pasado en Bogotá, con sus consecuencias, no representan lo esperado para el caso analizado aquí, ya que este análisis busca estimar los daños y el escenario de desastre probable para un área mucho más grande, la cual, además del centro y el sur, tiene presente la ocupación que, para los últimos cuarenta años, se ha extendido hacia el occidente, el norte y el noroccidente de la Sabana de Bogotá (Instituto Distrital de Cultura y Turismo, IDCT 2009), zonas que, para los tiempos actuales (2014), la ciudad presenta una gran densidad urbana. Entonces, de acuerdo con esto, se hace énfasis en los efectos que presentaron parte de los sectores con la ocurrencia del sismo con $M_W = 7.2$ del 9 de febrero de 1967, cuyo epicentro distante de Bogotá 209 km, se localizó en el municipio de Timaná en el departamento de Huila (IRIS 2005).

Aspectos geológicos generales de la cordillera Oriental y del Piedemonte Llanero

Los sistemas de fallas generadores de sismicidad en el Piedemonte Llanero se encuentran ubicados sobre el flanco oriental de la Cordillera Oriental y se asocian a una tectónica de piel delgada que se caracteriza por pliegues de arrastre y cabalgamientos de bajo ángulo, con rumbo N-NE. También se observa una tectónica de piel gruesa que involucra al basamento representado por medio de diversos altos, como los macizos de Bucaramanga, Garzón y Quetame, que afloran gracias al proceso de inversión tectónica que sufrieron fallas normales de alto ángulo y rumbo N-NE durante el lapso Paleógeno tardío-Neógeno, cuando la placa de Nazca inició su proceso de subducción bajo el margen noroccidental de Suramérica (Chicangana y Vargas-Jiménez 2013). Estas fallas, para el presente, tienen una cinemática con el componente horizontal predominantemente dextral. Las unidades estratigráficas que constituyen la Cordillera Oriental se forman, de base a techo, por el basamento ígneo-metamórfico Mesoproterozoico, unidades sedimentarias y metamórficas con edad Neoproterozoica, unidades sedimentarias con edad Paleozoica y secuencias sedimentarias que abarcan el lapso Jurásico superior-Holoceno (figura 2).

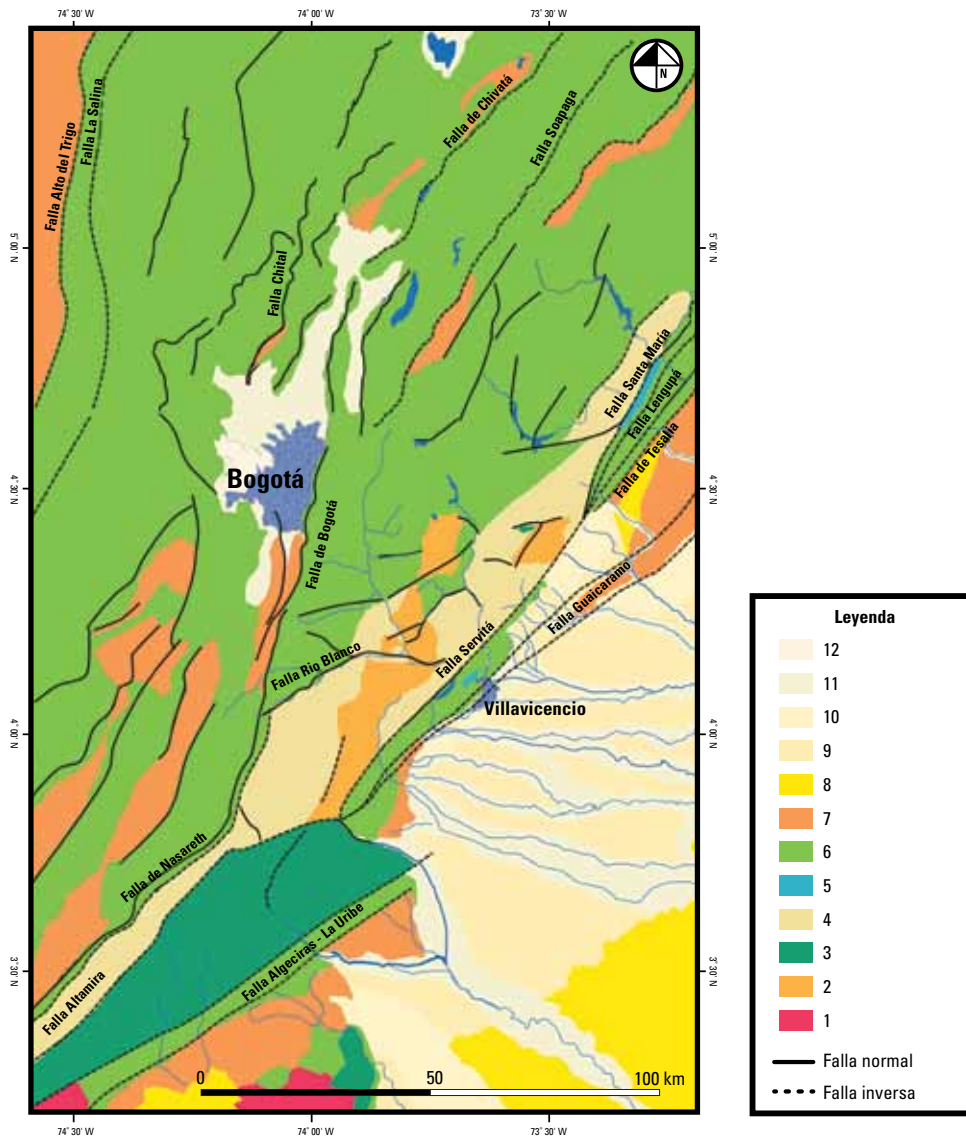


Figura 2. Mapa geológico de la región de estudio, en el que se muestran las principales fallas y unidades estratigráficas de manera muy general, para los lapsos geológicos más representativos.

Fuente: modificado de Gómez et ál. 2007.

Nota: 1) Mesoproterozoico indiferenciado. 2) Neoproterozoico indiferenciado. 3) Unidades Cámbrico-Ordovícicas. 4) Unidades Devónico-Carboníferas. 5) Jurásico indiferenciado. 6) Cretáceo indiferenciado. 7) Paleógeno. 8) Neógeno. 9) Pleistoceno inferior. 10) Pleistoceno medio. 11) Pleistoceno superior. 12) Holoceno.

El basamento para la parte central de la Cordillera Oriental, región que corresponde a los departamentos de Boyacá, Cundinamarca y Meta, exhibe rocas metasedimentarias relacionadas con el complejo Quetame, que está cubierto por unidades sedimentarias correspondientes a los lapsos Cámbrico-Ordovícico y Devónico-Carbonífero. Estas unidades se han estudiado, caracterizado y correlacionado con algunas perforaciones en los Llanos Orientales y a partir de columnas estratigráficas con recolección de fósiles, in situ, en la cordillera.

Las unidades sedimentarias que corresponden al lapso Jurásico-Cretáceo se caracterizan por tener espesores mayores y haber sido depositadas en ambientes marinos someros, durante pulsos transgresivos y regresivos, que fueron controlados por la relación velocidad de subsidencia de la cuenca - aporte de sedimentos en la misma.

Esta depositación marina ocurre durante dos eventos de subsidencia (Horton et ál. 2010). El primero ocurrió entre el Jurásico superior y el Cretáceo inferior, durante un periodo de *rift* (rotura y separación continental) y

produjo fallamiento normal en la zona en donde hoy se emplaza la Cordillera Oriental. El segundo evento que se presentó durante el Cretáceo superior, fue generado por una subsidencia termal post-*rift* (posrotura y separación continental), la cual estuvo acompañada por la acreción de un terreno oceánico de gran espesor (placa Caribe), que produjo una depresión en el centro de la cuenca que corresponde a la zona en donde, en el presente, se emplaza la Cordillera Oriental y la cuenca de los Llanos Orientales.

Horton et ál. (2010) sugieren que durante el lapso Paleoceno-Eoceno medio, para la región que hoy ocupa la Cordillera Oriental y los Llanos Orientales, se presenta un acortamiento y el desarrollo de una cuenca de antepaís acompañada por una incipiente Cordillera Oriental fraccionada. Luego, para el lapso Eoceno superior-Oligoceno inferior continúa el acortamiento y comienza la división de la cuenca de antepaís. Para finales del Oligoceno y principios del Mioceno, la Cordillera Oriental empieza a erigirse, de manera completa, separando la cuenca del valle del Magdalena de la cuenca de los Llanos Orientales, situación que culmina a partir del Mioceno superior, cuando la Cordillera Oriental emerge, de manera definitiva, produciendo la migración de la cuenca de antepaís hacia el oriente (actuales Llanos Orientales), dando lugar a la depositación de la formación Guayabo superior, que se constituye de una molasa, caracterizada por secuencias monótonas y gruesas de conglomerados (Parra et ál. 2010) relacionadas con el desarrollo de los grandes ríos que hoy definen la cuenca del Orinoco en Colombia.

Aspectos sismotectónicos de la cordillera Oriental y el Piedemonte Llanero

En el territorio colombiano convergen cuatro placas, las cuales en sentido oeste-este (figura 1) son: Nazca (que subduce bajo el noroccidente de Suramérica), la placa Caribe (que se amalgamó al margen noroccidental de Suramérica, entre finales del Cretáceo y durante el Paleógeno), el bloque Andino (que procede de la colisión Mesoproterozoica producida entre Laurentia y Gondwana y que dio origen al supercontinente Rodinia), y la placa suramericana, la cual es fija y está constituida por el cratón amazónico. Esta convergencia ha producido la evolución de la actual disposición orogénica de las cordilleras, desde hace cinco millones de años (figura 3), y según Mora y López (2011), la placa Nazca converge hacia Suramérica, a una velocidad de 70 mm/año, produciendo la deformación del territorio colombiano

y la movilidad de los bloques fracturados que, en su conjunto, conforman esta corteza continental. Como resultado de esa convergencia, en la litosfera colombiana se presentan dos principales zonas de sismicidad que incrementan la amenaza sísmica para Colombia: la zona de sismicidad intermedia (con sismos que se originan en profundidades que varían de 50 a 160 km; y la sismicidad superficial con sismos que se originan en profundidades que varían de 0 a 50 km. Esta última es resultado de la constricción de las placas Caribe y continental, por el empuje que produce la placa Nazca al subducir al occidente y al noroccidente, mientras que la sismicidad intermedia es resultado de la colisión de la placa, ya subducida, de Nazca con la placa previamente subducida Cretácico-Paleocena, denominada Farallón, colisión que al sur de 5 °N de latitud se produce por el acoplamiento del plano subducido con la litosfera continental, y al norte de esta latitud, por el desarrollo de un fenómeno de delaminación litosférica que ha dado origen al nido sísmico de Bucaramanga (Chicangana y Vargas-Jiménez 2008). Con la excepción de la región centro-occidental del país (Eje Cafetero y norte del departamento del Valle del Cauca), que se afecta por la zona de sismicidad intermedia al sur de 5 °N, en Colombia la sismicidad superficial es la que produce los sismos con mayores pérdidas económicas y de vidas.

Para la Sabana de Bogotá, la sismicidad superficial, capaz de producir un sismo con $M \geq 7.0$ tiene dos orígenes muy próximos, los cuales son hacia el oeste, el valle alto del Magdalena —en adelante, VAM— con las fallas Alto del Trigo, Bituima, Cambao, Honda e Ibagué, y hacia el este, la región del Piedemonte Llanero con el SFFFCO con las fallas de Algeciras-Uribe, Guaicaramo y Servitá (figura 4). La actividad del frente occidental de las fallas de la Cordillera Oriental (fallas Alto del Trigo, Cambao, Bituima, etc.), solo tiene registro histórico para el terremoto del 16 de junio de 1805, el cual destruyó la ciudad de Honda, pero no dejó registro alguno de consecuencias para Bogotá, en cuyos alrededores, la actividad sísmica más relevante se debe a la actividad tectónica de la falla Servitá y sus satélites (Chicangana, Vargas-Jiménez y Caneva 2013). La falla Servitá es una de las dos fallas maestras que han ayudado a construir orogénicamente este sector de la Cordillera Oriental, durante los últimos tres millones de años (Mora 2007). Esta construcción continúa y se manifiesta con la sismicidad superficial local, originada tanto en las fallas del VAM como en la falla Servitá (figuras 5 y 6).

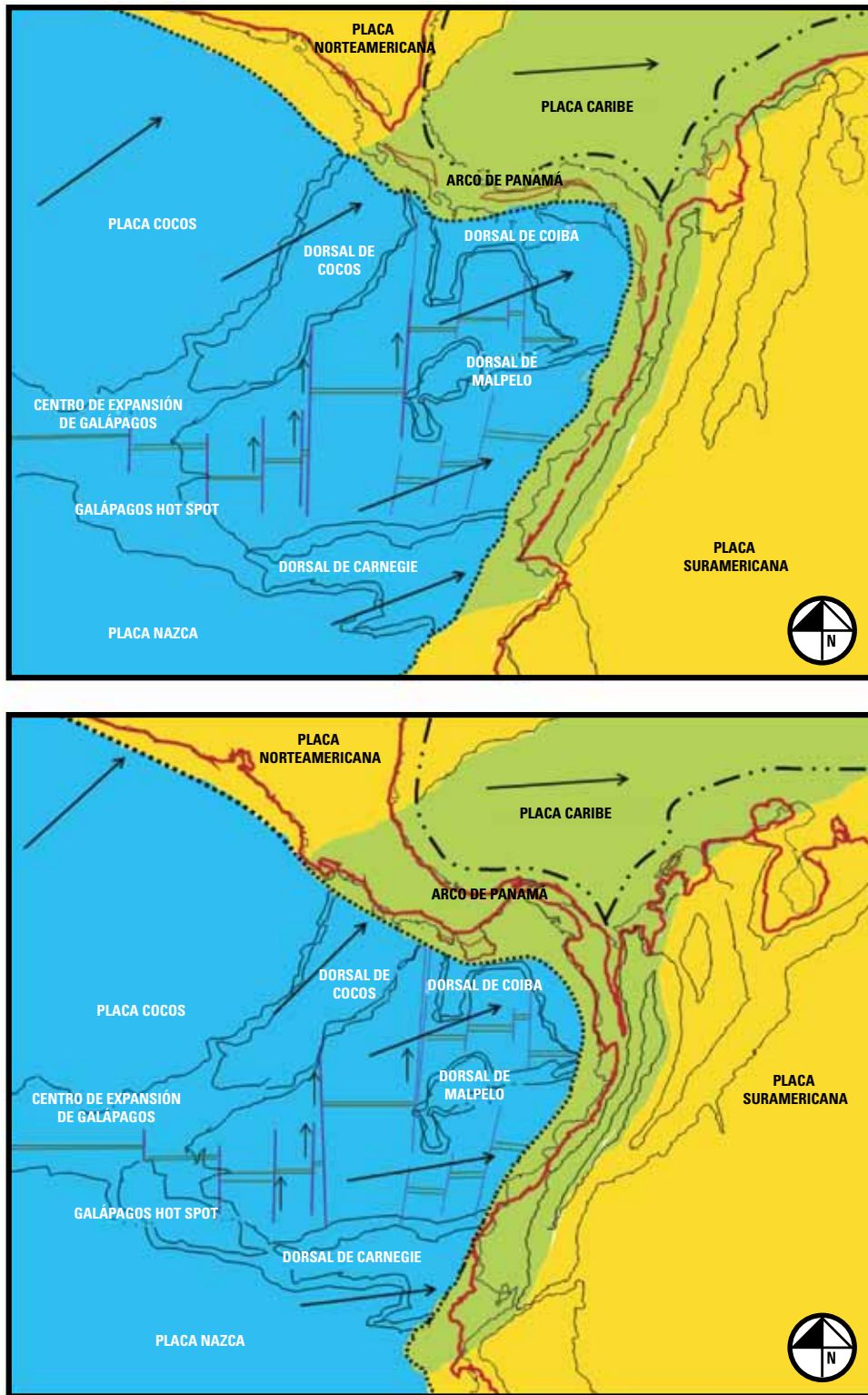


Figura 3. Esquema geodinámico hipotético en el que se aprecia la evolución orogénica del noroccidente de Suramérica, la placa Caribe (en verde) y la placa de Nazca (en azul).

Fuente: Chicangana y Vargas-Jiménez 2013.

Nota: para el lapso Mioceno superior-Plioceno inferior (arriba) y para el lapso Plioceno superior-Pleistoceno inferior (abajo).

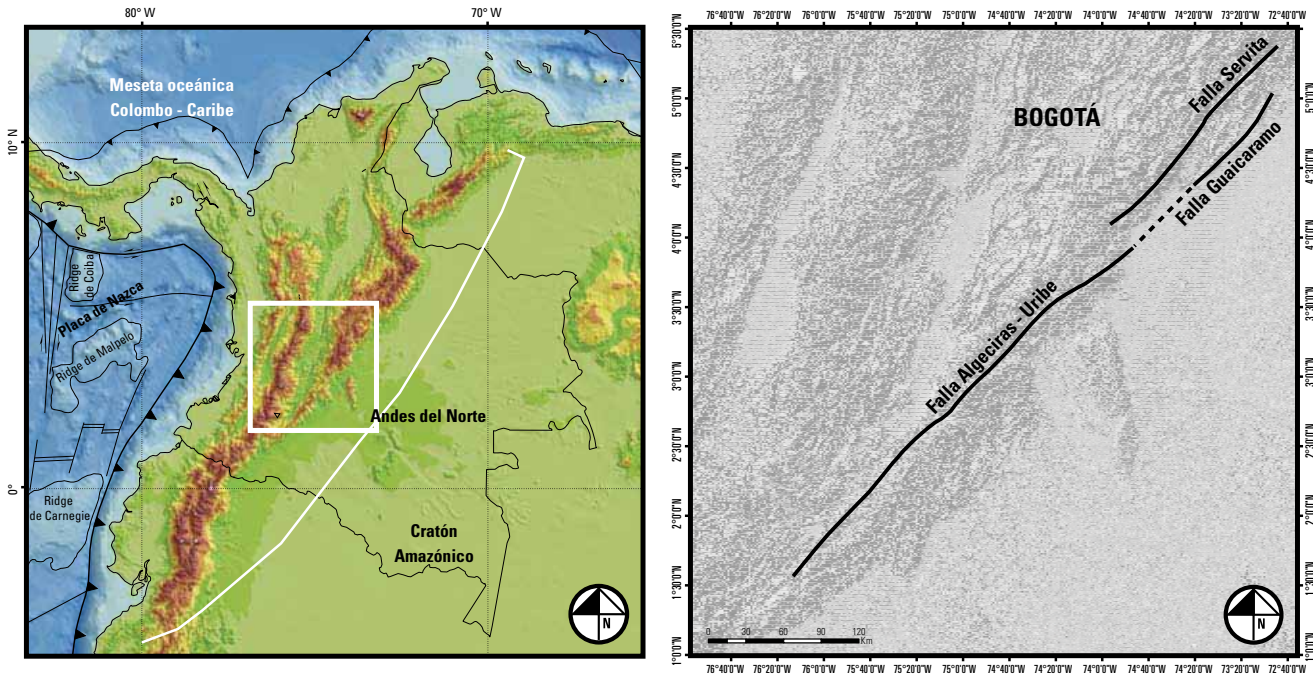


Figura 4. Localización de la región de estudio en la que se puede apreciar el área metropolitana de Bogotá y de las fallas principales relacionadas con el SFFCO, en la parte central de la Cordillera Oriental colombiana.

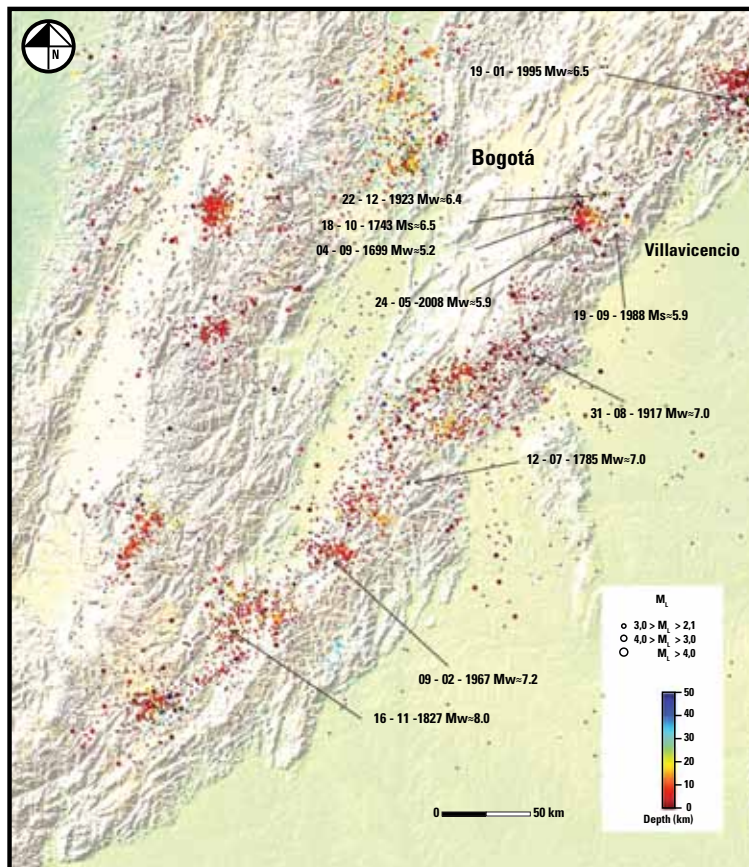


Figura 5. Grandes terremotos históricos relacionados con el SFFCO, junto con el registro instrumental de la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC).

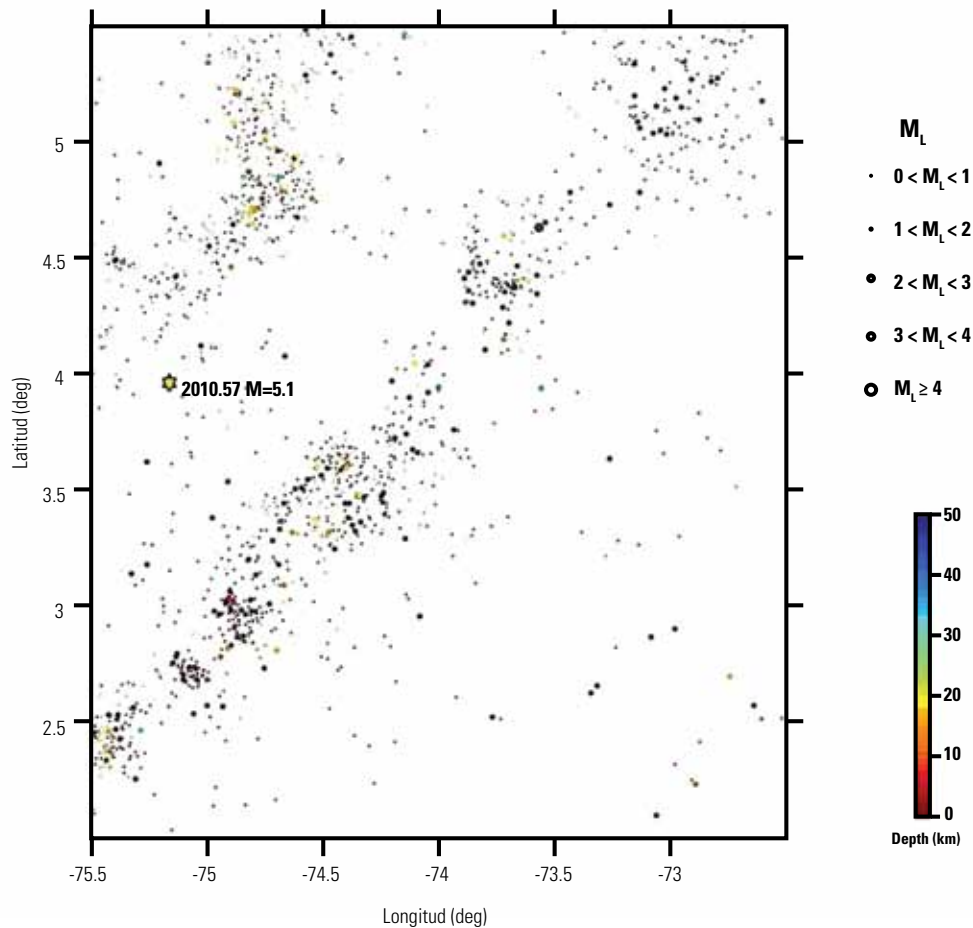


Figura 6. Registro instrumental de la RSNC para el centro de Colombia, durante el lapso 2009-2012.

Nota: en esta gráfica se observa la sismicidad distribuida espacialmente del SFFCO.

Trabajos previos han asignado los sismos de 1743 y 2008 a la falla Servitá, los sismos de 1923 y 1924 a la falla Guaicaramo y los sismos de 1785, 1827, 1917 y 1967 a la falla Algeciras-Urbe (Chicangana et ál. 2012, Espinosa 2003, Sarabia et ál. 2010).

Geología de la Sabana de Bogotá

La Sabana de Bogotá es una cuenca sedimentaria (figura 7) ubicada sobre una serie de anticlinales y sinclinales con rumbo N-NE, destacándose entre estos los anticlinales de Bogotá, Soacha y Sopó, y los sinclinales de Sisga, Subachoque, Suesca, río Frío, Usme y Zipaquirá (Montoya y Reyes 2005). En el área metropolitana de

Bogotá, estas estructuras solo se presentan hacia los cerros, dejando aflorar diferentes unidades estratigráficas, compuestas por rocas sedimentarias que abarcan, en tiempo geológico, desde el Cretáceo superior hasta el Paleógeno inferior, las cuales constituyen el basamento de la cuenca; rellenando de manera parcial estas, se presenta una sucesión de sedimentos de tipo fluvial y lagunar que abarcan, en tiempo geológico, el lapso Mioceno superior-Holoceno. Esta sucesión sedimentaria conforma la Sabana de Bogotá. En la base de esta sucesión afloran sedimentos de origen fluvial denominados formación Tilatá, los cuales están compuestos por arenas y gravas con diferentes episodios de aportes fluviales derivados de ríos trenzados y con alta energía. El espesor total de esta unidad es de 83 m (Montoya y Reyes 2005).

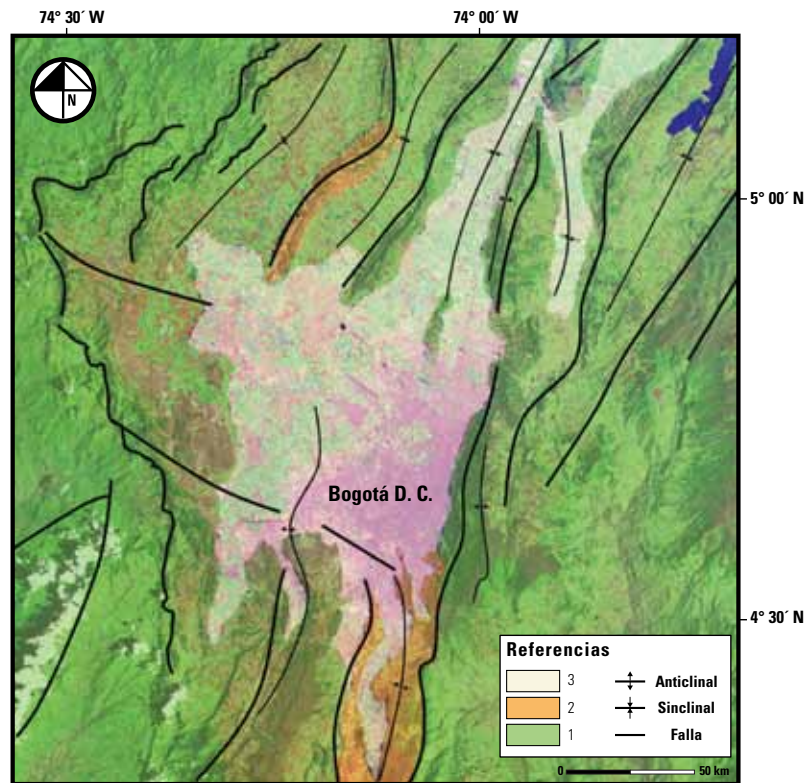


Figura 7. Mapa geológico de la Sabana de Bogotá con las principales fallas y unidades estratigráficas, de manera muy general, para los lapsos geológicos más representativos. Fuente: modificado de Gómez et ál. 2007.
Nota: 1) Cretáceo indiferenciado. 2) Paleógeno. 3) Cuaternario.

Cubriendo la formación Tiltatá se presentan las arenas arcillosas con gravas y arcillas con turba, que representa la formación Subachoque, la cual corresponde al Pleistoceno inferior (Gelasiano). Estos sedimentos corresponden a un ambiente aluvial. Encima de esta última, se presenta la formación río Tunjuelito (Montoya y Reyes 2005), que consiste de alternaciones de gravas con arcillas, arcillas turbosas y arenas.

La diferencia cronoestratigráfica de esta unidad con la formación Subachoque es difícil de estimar, ya que en la literatura tales unidades representan al Pleistoceno, y sus sedimentos presentan características litológicas muy semejantes, indicando, en ambos casos, ambientes aluviales, muy posiblemente derivados de un estado interglaciar particular, y el asunto se torna incierto ya que, para la formación río Tunjuelito, no existe precisión del tiempo, para diferenciarla de la formación Subachoque durante el Pleistoceno.

Reposando sobre las anteriores, y con un espesor máximo de 320 m (Helmens y Van der Hammen 1995), se presenta la formación Sabana, compuesta de arcillas, arenas finas, cenizas volcánicas, turbas y esporádicos

depósitos delgados de gravas y turbas; dicha formación abarcó el lapso Pleistoceno medio superior y representa la evolución de un lago que ocupó, en extensión, casi la totalidad de la Sabana de Bogotá. Cuando la cuenca se colmató de sedimentos, hace 30.000 años (Torres, Vandenbergheand y Hooghiemstra 2004), este lago desapareció para convertirse en la llanura boscosa que daría lugar a la actual Sabana de Bogotá, a finales del Pleistoceno superior (Van der Hammen y González 1963). Los sedimentos de la formación Sabana fueron cubiertos por la formación Chía que está constituida por depósitos de tipo fluvial, cuyas edades abarcan desde 16.000 años antes del presente Holoceno (Montoya y Reyes 2005).

Aspectos geotécnicos de la Sabana de Bogotá

De acuerdo con el estudio de *Microzonificación sísmica de Bogotá* (figura 8), la Sabana de Bogotá presenta una variación en los valores de las aceleraciones espectrales de sus suelos, que van desde 0,4 hasta 0,8 g (Ingeominas y Universidad de los Andes 1997). Para el sector que corresponde al área metropolitana de Bogotá y que se

relaciona con la formación Sabana, la profundidad de los sedimentos no consolidados y altamente saturados con agua varía de entre 130 hasta más de 250 m.

Los suelos que se ubican hacia el occidente y noroccidente del área metropolitana de Bogotá, presentan índices de plasticidad, que fácilmente llegan hasta el 250% desde la superficie hasta 50 m de profundidad. En el estudio de *Microzonificación sísmica de Bogotá* estos suelos se denominan Zona 4 Lacustre B (figura 8). Siguiendo el eje de la calle 80, entre oriente y occidente, se discurre, de manera paralela, la cuenca del río Juan Amarillo, del cual deriva el humedal del mismo nombre

o laguna de Tibabuyes. Todo este suelo, que corresponde a zonas de inundación tanto del río Bogotá como de sus afluentes, se define entonces como depósitos aluviales muy recientes, compuestos por sedimentos no consolidados que producen muchas dificultades de tipo geotécnico, produciendo entre otros, la inclinación de estructuras y edificios, como por ejemplo en viviendas y edificios de apartamentos del barrio Polo o La Colina Campestre, en Suba, e inundaciones como las que frecuentemente se presentan en la cabecera occidental de la pista sur del Aeropuerto Internacional El Dorado (figura 9).

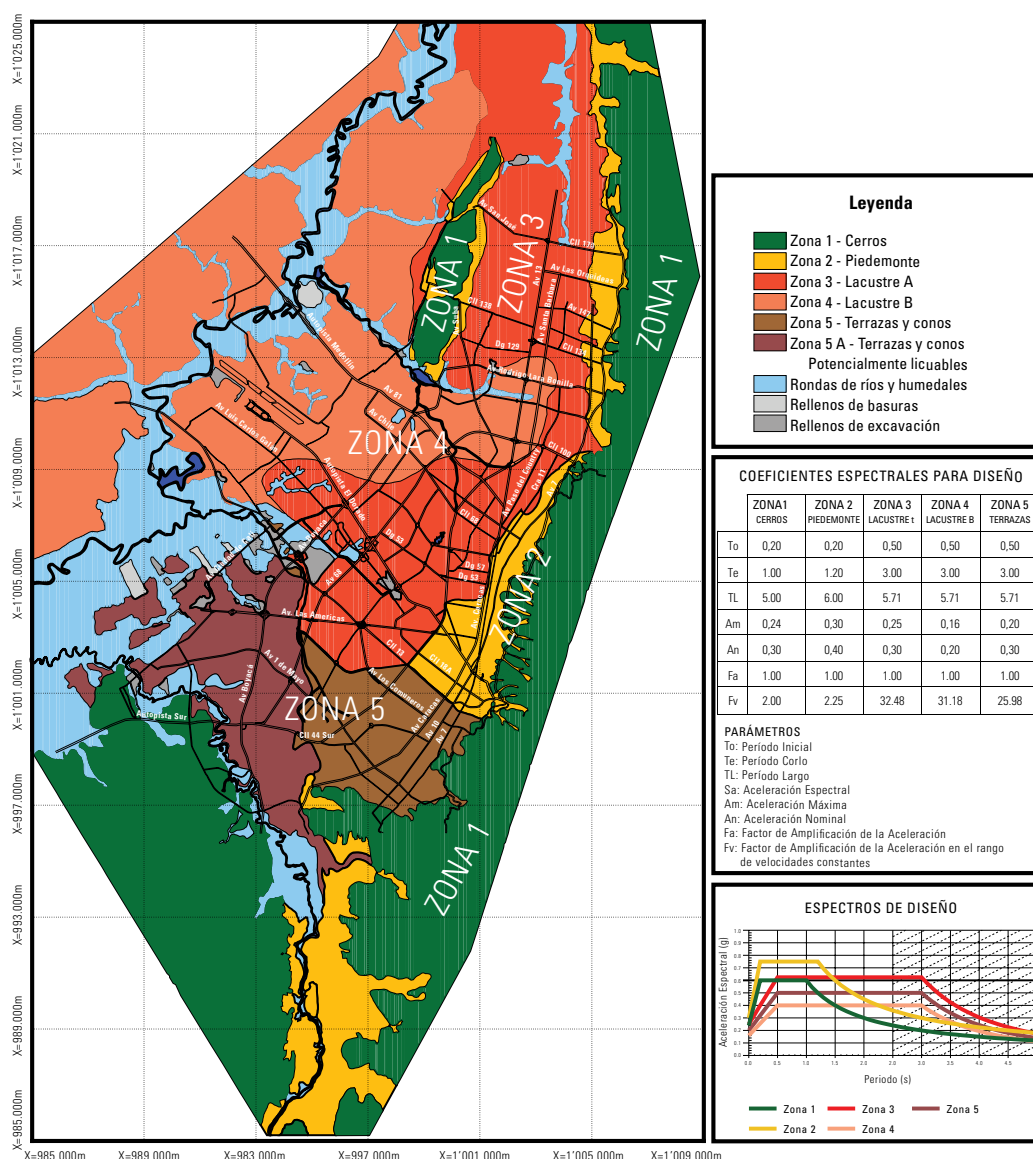


Figura 8. Mapa de microzonificación sísmica de Bogotá. Fuente: Ingeominas y Universidad de los Andes 1997.



Figura 9. Panorámica del occidente de Bogotá en sentido sur-norte.

Fotografía de Chicangana, mayo del 2011.

Nota: obsérvese en primer plano la inundación, por desborde del río Bogotá, de la cabecera occidental de la pista sur del Aeropuerto Internacional de El Dorado.

Las aceleraciones espectrales esperadas para estos suelos altamente saturados con agua, de acuerdo al estudio de *Microzonificación sísmica de Bogotá*, son del orden de 0,40 a 0,60 g, con periodos que pueden llegar hasta 3 s (Ingeominas y Universidad de los Andes 1997).

Los otros sectores que corresponden a las zonas 2 Piedemonte y 3 Lacustre A (Ingeominas y Universidad de los Andes 1997), con la ocurrencia del sismo del 9 de febrero de 1967, presentaron daños de consideración en edificios e iglesias de Bogotá (OSSO 2008). La zona 2 es el sector de Bogotá con más tiempo de ocupación, ya que corresponde a su área céntrica y a la que históricamente se le han cuantificado sus efectos con los sismos de los siglos XVIII, XIX y con el sismo de 1917.

Discusión

El grado de amenaza sísmica al que está expuesta la Sabana de Bogotá, en el tema geotécnico, es similar al de la Ciudad de México. Para Colombia un sismo como el que afectó México, de magnitud $M > 8.0$ y que obedeció a unas condiciones sismotectónicas relacionadas con la ruptura de una asperidad, con una profundidad focal menor a 20 km, en una zona de subducción y donde, además, su epicentro se ubicó a 385 km del área afectada, no se ha verificado todavía para el territorio colombiano. Esto, debido a que

se carece de información tanto paleosismológica como macrosísmica que den indicios sobre los sedimentos de la Sabana de Bogotá como sobre los de otros lugares del occidente del país, que puedan indicar la ocurrencia de un sismo de magnitud (M) > 8.0 , que simultáneamente haya afectado con muy alta intensidad todo el occidente colombiano y la Sabana de Bogotá. Estos criterios confirmarían que su epicentro se relacione para la trinchera colombiana. En otras palabras, con la correlación sincrónica de evidencias paleosismológicas ubicadas en varios lugares del occidente colombiano, los depósitos anómalos en línea de costa relacionados con tsunamis, y las sísmicitas en los sedimentos de la Sabana de Bogotá, y la realización de un esbozo macrosímico derivado de estas evidencias para un tiempo simultáneo, se podría confirmar un evento sísmico semejante. Se debe señalar que en la zona central de la trinchera colombiana recientemente ocurrieron los sismos del 17 de noviembre de 1991 y del 15 de noviembre del 2004, ambos con $M_W = 7.2$. Estos sismos tuvieron sus epicentros a una distancia aproximada de 380 km de Bogotá, la cual es similar a la del terremoto que afectó a la Ciudad de México, el 19 de septiembre de 1985, sin embargo estos sismos solo afectaron el occidente colombiano y en especial a la ciudad de Cali, donde se presentaron daños importantes a algunos edificios. Los epicentros de estos terremotos distaron

180 km de Cali. La ocurrencia de un sismo de $M > 8,0$ en el SFFFCO es posible, y sus consecuencias tendrían un alcance muy similar al del sismo ocurrido recientemente en la provincia de Sichuan en China, el 8 de mayo del 2008 con $M = 8,0$ (Zhang, Dong y Yang 2009). Un evento de esta magnitud, para Colombia, cuya fuente sea una falla intracordillerana, solo se relacionaría con el escenario macrosísmico expuesto por Espinosa (2003) para el sismo del 16 de noviembre de 1827 y que se sintió con intensidad VII hasta una distancia de más de 300 km del epicentro (Espinosa 2003; OSSO 2008). A este terremoto, su epicentro se lo relaciona con la falla Algeciras-Uribe (véase figura 4). Este sismo, en particular, produjo la destrucción de las edificaciones de gran parte de la ciudad de Bogotá de esa época, al igual que afectó fuertemente poblaciones de la Sabana, como Bojacá, Chía, Engativá y Soacha (OSSO 2008).

Con la ocurrencia de un sismo de estas características, el modelo de desastre que se pronostica para el área metropolitana de Bogotá es bastante similar al que se presentó en Ciudad de México, por la similitud de sus suelos, pero, incluso, superaría el pronóstico expuesto por el Fondo de Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá D. C. (Fopae 2011).

En el caso del valle de México, sus suelos se originaron en un lago que se desarrolló durante el lapso Pleistoceno medio-Holoceno (Díaz-Rodríguez 2006) y al parecer la ocupación humana del lago, durante los últimos 500 años, lo ha ido desecando, a tal punto que hoy no se presenta evidencia de este. Los suelos lacustres de la cuenca de México según Díaz-Rodríguez, se constituyen de arcillas, arenas y limos con un contenido de agua y límites de Atterberg similares a los suelos lacustres de la Sabana de Bogotá (Ingeominas y Universidad de los Andes 1997).

De acuerdo con el estudio de *Zonificación sísmica de Bogotá*, el límite líquido de las zonas lacustres A y B del área metropolitana de Bogotá, en función de la profundidad, superan el 200% hasta 50 m de profundidad y son susceptibles de producir aceleraciones altas de hasta 0,5 g con periodos que pueden llegar hasta 3 segundos.

Las aceleraciones máximas del suelo que se presentaron en ciudad de México, con ocasión del terremoto del 19 de septiembre de 1985, fueron más altas en aquellas zonas en donde predominaban depósitos lacustres. En estos casos se encontró que para los suelos con alta saturación de agua y en donde la licuación de suelos produce inestabilidad y hundimiento de las edificaciones, las destrucciones fueron mayores por efecto del terremoto, porque en estos suelos se presentaron las máximas

aceleraciones para periodos superiores a 1 s (Ordaz y Pérez 1997; Ordaz y Zeballos 2007; Reinoso 2007).

En Bogotá, a partir de la década de 1950 (figura 10) se da inicio a la urbanización de las zonas 3 y 4 clasificadas por el estudio de microzonificación sísmica de Bogotá como lacustres. En estas zonas del área metropolitana es frecuente la inclinación y el hundimiento de las calles y las edificaciones por el fenómeno de la licuación de suelos. Para el occidente y noroccidente del área urbana, se destacan sectores residenciales como el Centro Urbano Antonio Nariño, construido entre 1952 y 1955 (Montoya 2007), el barrio El Polo, que inició su construcción en 1958 (Espinosa 2007), o el barrio Niza, que se inició en 1964 (Maya 2007). En los sectores residenciales ubicados en estas zonas es común observar tanto inclinación como hundimiento de sus calles, edificios y viviendas. Se trata evidentemente de la ocupación de llanuras aluviales susceptibles de inundaciones por cuerpos de agua, y presentan como consecuencia el fenómeno de la licuación de suelos fuerte en términos de aceleraciones espectrales y/o intensidades. El epicentro del sismo de Tauramena se ubicó a 140 km de distancia de Bogotá y el de Quetame a 45 km. Para ambos casos, en los suelos de las zonas 3 y 4, se alcanzaron intensidades en la escala modificada de Mercalli, que superaron VI a pesar de que fueron producidas por sismos con $M \leq 6.5$ en distancias del epicentro que variaron de entre 45 km para $M = 5.9$ y 109 km con $M = 6.5$ (figura 11).

Para la ciudad de México, la figura 12 muestra el efecto de las aceleraciones espectrales máximas esperadas para $T = 2$ s, con un sismo postulado de $M = 8.2$, originado a una distancia similar a la del epicentro del sismo del 19 de septiembre de 1985 y, para este caso, las aceleraciones en componente E-W serán superiores a 1.000 gales (Ordaz y Zeballos 2007), que equivalen a una intensidad de X.

En el caso de sismo del 19 de septiembre de 1985 con $M = 8.1$, la aceleración máxima del suelo, en las zonas de mayor destrucción, superó en $T = 0$ s, 201 gales (Ordaz y Pérez 1997), mientras que para Bogotá, con el sismo de Quetame con $M = 5.9$, se alcanzó un máximo de 175 gales al noroccidente, con $T = 2$ s (Bermúdez, Abril y Lozano 2009) y esto deja mucho para pensar sobre la amenaza sísmica para las localidades de Engativá y Suba principalmente, ya que en esta oportunidad se alcanzaron intensidades de VII, con una magnitud baja y, frente a este último epicentro, se tiene como antecedente el sismo del 18 de octubre de 1743 (Salcedo y Gómez 2013), el cual se atribuye a la falla Servitá (Chicangana et ál. 2012; Chicangana, Vargas-Jiménez y Kammer 2013).

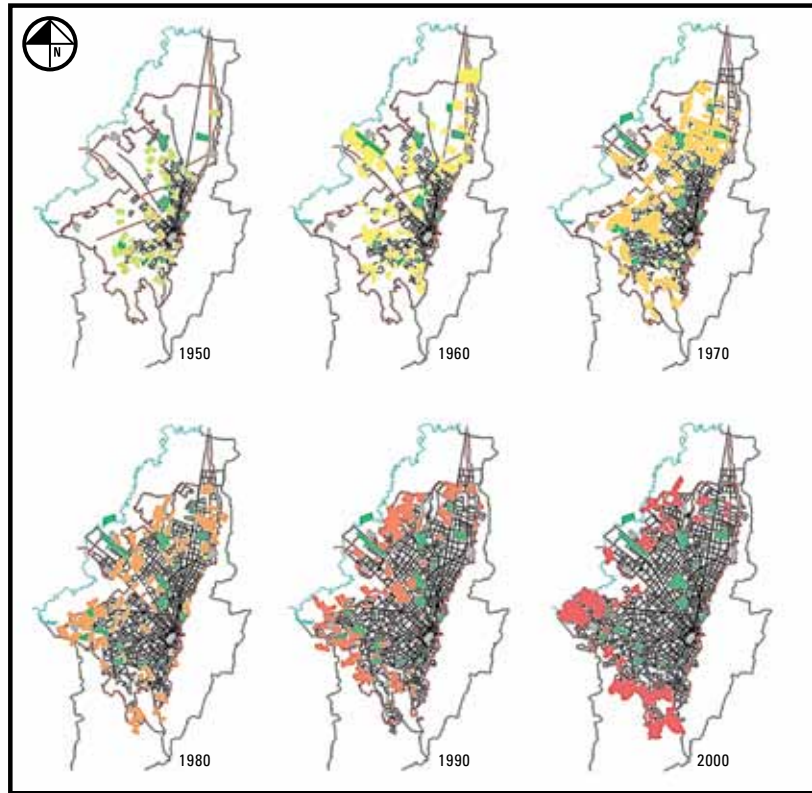
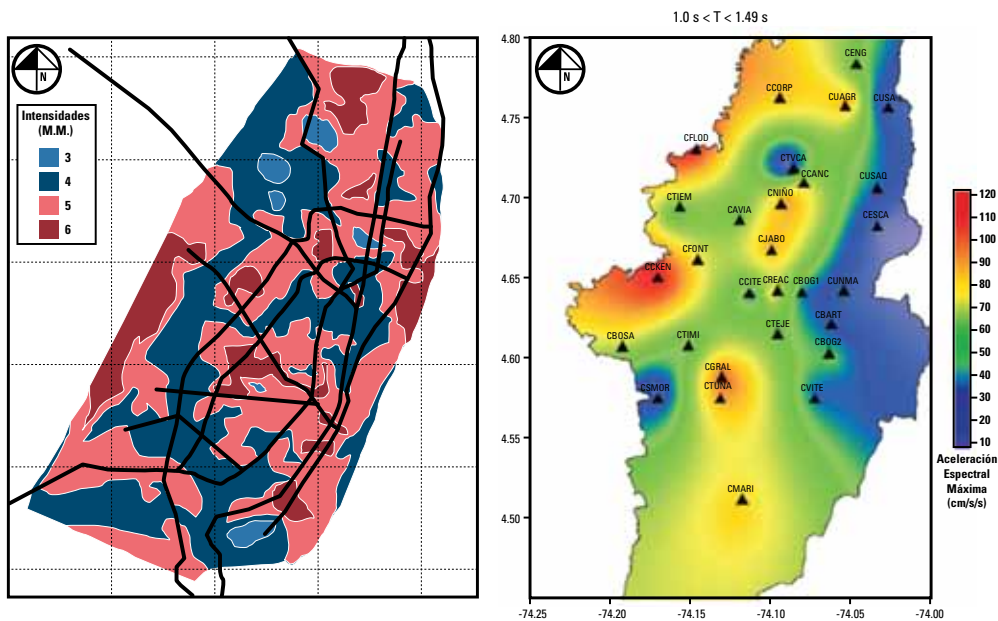


Figura 10. Secuencia del proceso de ocupación urbana de Bogotá entre 1950 y el 2000. Fuente: modificado de IDCT 2009.



Sismo de Tauramena enero 19 de 1995, Mw = 6.5

Sismo de Quetame Mayo 24 de 2008, Mw = 5.9

Figura 11. Mapas de respuesta sísmica para el área metropolitana de Bogotá. Nota: mapa de intensidades en la escala modificada de Mercalli, producidas por el sismo de Tauramena del 19 de enero de 1995, según Ingeominas y Universidad de los Andes (1997), a la izquierda, y el mapa de aceleraciones espectrales máximas con $1,0 < T < 1,49$ s recogidas por la red de acelerógrafos instalada en el área metropolitana de Bogotá, de acuerdo con Bermúdez, Abril y Lozano (2009), con ocasión de la ocurrencia del sismo de Quetame de mayo del 2008, a la derecha.

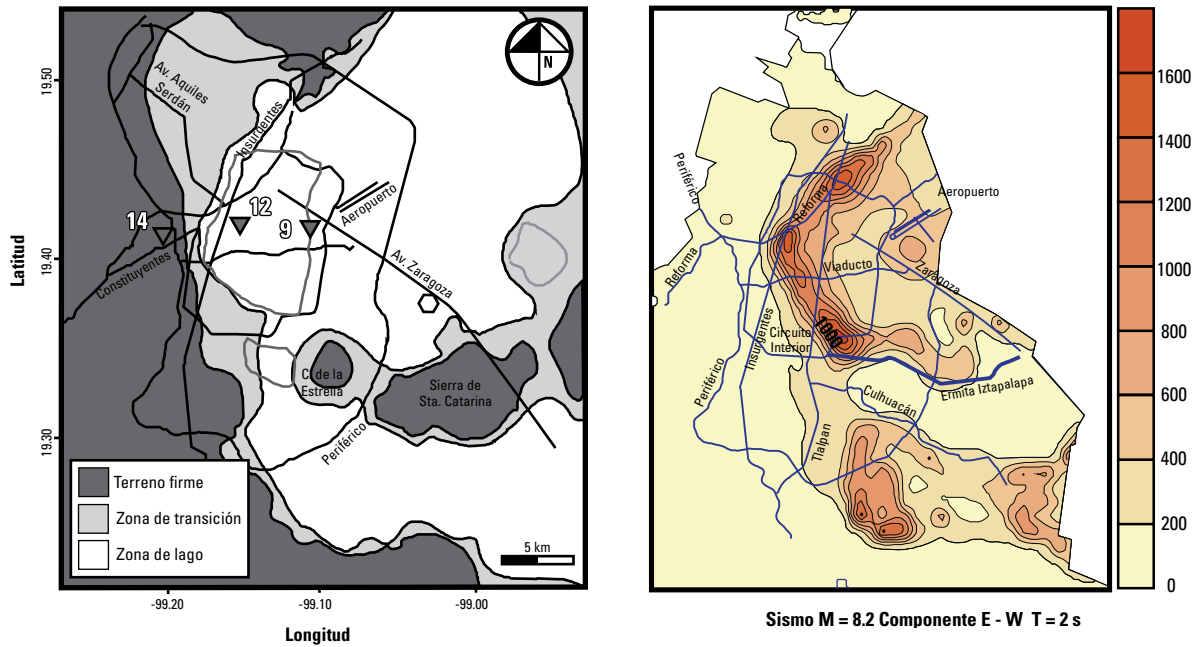


Figura 12. Mapas de la zonificación y respuesta sísmica para el área metropolitana de ciudad de México.
 Nota: mapa de la zonificación sísmica, según Pech, Jiménez y Cárdenas (2010), junto con las zonas de daño de los sismos de septiembre de 1985 (zonas rectangulares con líneas rojas) a la izquierda, y mapa de aceleraciones espectrales para $T = 2$ s en componente E - W originadas por un sismo de $M = 8.2$, con epicentro en la trinchera de Guerrero, a unos 330 km de ciudad de México (Ordaz y Zeballos 2007), a la derecha.

Para el sismo del 9 de febrero de 1967, con magnitud $M_w = 7.2$, instrumentalmente su epicentro se relacionó con la falla Algeciras-Uribe y ubicó una distancia de 209 km de Bogotá (IRIS 2005). OSSO (2008) indica que este terremoto en Bogotá produjo 13 víctimas mortales y afectó, de manera importante, las construcciones con tipologías constructivas del siglo XVIII y principios del siglo XIX, pero no de una manera grave, como la descrita por la misma fuente para el sismo de 1827. El Centro Urbano Antonio Nariño, al igual que otras edificaciones construidas de concreto y acero, sufrió con este sismo algunos daños de consideración.

Con lo anterior, está claro que la amenaza sísmica de la área metropolitana de Bogotá va en función de la magnitud del sismo, de su distancia epicentral y de cómo los suelos lacustres responderán sísmicamente. Desde la perspectiva histórica, el sismo del 16 de noviembre de 1827 llama la atención, así como el potencial sísmico de la falla Algeciras-Uribe perteneciente al SFFFCO y a la que se le asignan, igualmente, los sismos de 1785, 1917 y 1967. Es muy posible que esta falla pueda producir un sismo con $M > 7.5$ o, inclusive, supere en magnitud de momento (M) el valor de 8.0. Si esto ocurre, la respuesta sísmica de los suelos de las zonas 3 y 4 del área metropolitana de Bogotá produciría escenarios de catástrofe

similares o quizá más graves a los presentados en Ciudad de México en 1985 y, posiblemente, supere el pronóstico de desastre establecido por Fopae (2011).

Conclusiones

En este trabajo se encontró que el área metropolitana de Bogotá es altamente vulnerable ante a un sismo con $M > 7.0$, cuyo epicentro se localice a menos de 250 km. La naturaleza y el papel geotectónico del SFFFCO y, en particular, para el sistema de fallas Algeciras-Uribe señalan que esta sismofuente puede ser capaz de producir un sismo de $M > 7.0$ y epicentro cuya distancia a Bogotá sea menor de 250 km. La alta magnitud derivada de un eventual sismo producido en esta falla, se debe a su función en el esquema geodinámico que se presenta al suroccidente colombiano, el cual es el de estar cerca de la zona de la trinchera colombo-ecuatorial, donde el empuje de la placa de Nazca, al subducir, produce en el territorio continental un fuerte desplazamiento de sus microbloques en tendencia NE que es el rumbo de esta falla (Mora y López 2011).

Las fallas Algeciras-Uribe y Servitá, que son las más próximas a Bogotá, son límites de los dos bloques

continentales que constituyen la litosfera colombiana (Chicangana et ál. 2012) y representan un contexto geotectónico, para producir sismos con magnitudes $M > 7.0$, muy similar al que se presenta en la meseta oriental del Tíbet (Zhang, Dong y Yang 2009).

La movilidad de la falla Algeciras, en su historia sismológica como límite de bloques continentales, ha producido los sismos históricos de 1785, 1827, 1917 y 1967, todos los cuales arrojaron pérdidas de vidas y destrucción de construcciones para Bogotá. Las zonas 2 y 5 que se componen de suelos derivados del piedemonte de los cerros orientales, y por conos y terrazas aluviales relacionadas a la evolución fluvial de este piedemonte, respectivamente, produjeron la aceleración espectral de sus suelos con ocasión de los sismos anteriores a 1967. La zona 5, con un periodo largo de 3 s y una aceleración esperada de 0,6 g para su espectro de diseño, da una respuesta muy similar a la de las zonas 3 y 4, cuyas aceleraciones espectrales son ligeramente inferiores (Ingeominas y Universidad de los Andes 1997). Con la ocurrencia del sismo de 1967 entró en juego la zona 3, cuando ya la ciudad, durante el transcurso de 1950 a 1960, comenzó a urbanizarse hacia el occidente y las consecuencias de este sismo para las construcciones de concreto y acero como el Centro Urbano

Antonio Nariño fueron bastante importantes. Desde 1967 hasta hoy, y con el subsiguiente crecimiento de Bogotá, se puede pronosticar que la ocurrencia de un sismo con las características macrosísmicas del ocurrido en 1827 ($M > 7.5$) resultará en un escenario de desastre para la Sabana de Bogotá, bastante parecido o peor al presentado en Ciudad de México por el sismo del 19 de septiembre de 1985.

Agradecimientos

Germán Chicangana agradece especialmente al arquitecto Carlos Alberto Díaz Riveros, líder del Grupo de investigación de patrimonio y territorio, Pater, adscrito al Centro de Investigaciones de Arquitectura e Ingeniería Civil—Rogelio Salmons—de la Corporación Universitaria del Meta, por la ayuda en la obtención de información y orientación frente a la historia del desarrollo urbano de Bogotá D. C. Este trabajo forma parte de los resultados del proyecto “Análisis sismotectónico de la falla Servitá, departamentos de Cundinamarca y Meta”, Código 12455218627, contrato RC 784 - 2011 Colciencias - Corporación Universitaria del Meta de Villavicencio.

Germán Chicangana

Ingeniero de Minas de la Fundación Universitaria de Popayán (Colombia, 1996) y Magíster con énfasis en Geología de la Universidad Nacional de Colombia (Bogotá, 2005). Fue profesor investigador de la Corporación Universitaria del Meta (Villavicencio, Colombia) y actualmente se desempeña como profesor de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Santo Tomás, sede Villavicencio. Investigador del Grupo Geofísica del Departamento de Geociencias de la Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia. Su labor investigativa abarca temas relacionados con amenaza sísmica, geodinámica, geotectónica y sismotectónica.

Carlos Alberto Vargas-Jiménez

Geólogo de la Universidad de Caldas (Colombia, 1994), Magíster en Ingeniería Sísmica (2000) y Ph. D. en Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural de la Universidad Politécnica de Catalunya (España, 2004). Es profesor asociado y líder del Grupo de Geofísica del Departamento de Geociencias, Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Su labor investigativa abarca temas en geología, geofísica aplicada, desarrollo de instrumentación geofísica y sismología.

Andreas Kammer

Geólogo de la Universidad de Berna (Suiza, 1980) y DSc. en Geología de la Universidad Neuchatel (Suiza, 1985). Profesor asociado y líder del Grupo de Fracturas del Departamento de Geociencias, de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Su labor investigativa abarca temas en geología estructural, tectónica y geología regional.

Alexander Caneva

Físico (1992), Magíster en Física (1995) y Ph. D. en Física (2001) de la Universidad Estatal de Moscú (Rusia). Profesor de la Pontificia Universidad Javeriana y de la Universidad Antonio Nariño de Bogotá. Investigador en Física y Sismología de la Dirección Nacional de Investigaciones (DNI) de la Universidad Antonio Nariño (Bogotá).

Elkin Salcedo Hurtado

Licenciado en Matemáticas y Física de la Universidad Tecnológica del Chocó (1986) y Ph. D. en Física y Matemáticas (área de Geofísica) de la Universidad Estatal de Moscú (Rusia, 1992). Es profesor titular de la Universidad del Valle (Colombia). Investigador de Ingeominas (1992-1996), Coordinador del Programa de Investigación sobre Estructura y Dinámica del Interior de la Tierra. Actualmente, director del Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroccidente de la Universidad del Valle.

Augusto Gómez Capera

Físico de la Universidad Nacional de Colombia (1998) y Ph. D. en Ciencias Geológicas y Geotecnologías de la Universidad de Milán (Italia, 2007). Investigador de Ingeominas, geofísico en Inforpetrol y profesor de Matemáticas en la Universidad Nacional de Colombia. Desde el 2005 es investigador en el tema de la amenaza sísmica en el Istituto Nazionale di Geofísica e Vulcanologia (Italia), con el que ha desarrollado proyectos relacionados con sismicidad histórica y macrosísmica, tanto para Italia como para la Unión Europea.

Referencias

- Bermúdez, María Luisa, Claudia Abril y Carlos Lozano. 2009. "Respuesta sísmica de Bogotá ante la ocurrencia de un sismo superficial del borde llanero". Memorias de resúmenes del XII Congreso Colombiano de Geología, 9 al 11 de septiembre. Paipa: Servicio Geológico Colombiano. CD-ROM.
- Chicangana, Germán y Carlos Alberto Vargas-Jiménez. 2008. "Seismotectonic Analysis of the Bucaramanga Seismic Nest, Colombia". Resúmenes extendidos del 7th International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG 2008), 2 al 4 de septiembre, 128-131. Niza: University of Nice.
- Chicangana, Germán, Carlos Alberto Vargas-Jiménez, Alexander Caneva, Claudia Mojica-Sánchez, Tulio Aymerich Hernández-Hernández, Johann Ardila-Escobar y Alejandra Bernal-Jiménez. 2012. "The Seismic Hazard of the Villavicencio City, Colombia". En *Earthquakes: Triggers, Environmental Impact and Potential Hazards*, editado por Kostas Konstantinou, 39-70. New York: Nova Science Publishers.
- Chicangana, Germán, Carlos Alberto Vargas-Jiménez y Alexander Caneva. 2013. "El posible escenario de un sismo de magnitud $\geq 6,5$ para la ciudad de Villavicencio (Colombia)". *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 22 (2): 171-190.
- Chicangana, Germán, Carlos Alberto Vargas-Jiménez y Andreas Kammer. 2013. "The Servitá Fault, Eastern Cordillera, Colombia: An Active Thrust Able to Produce an M > 7.0 Earthquake Very Near to Bogotá D. C.". Suplemento *Acta Geologica Sinica (English Edition)* 87:348-350. http://www.geojournals.cn/dzxben/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=dzxben2003z10196&flag=1
- Chicangana, Germán y Carlos Alberto Vargas-Jiménez. 2013. "The Subduction Geometry Change under Colombia and Orogenic Evolution of the Northern Andes in Late Neogene Times". Suplemento, *Acta Geologica Sinica (English Edition)* 87:116-118. http://www.geojournals.cn/dzxben/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=dzxben2003z10064&flag=1
- Díaz-Rodríguez, Jorge Abraham. 2006. "Los suelos lacustres de la ciudad de México". *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil* 6 (2): 111-130. <http://academic.uprm.edu/laccei/index.php/RIDNAIC/article/viewFile/113/112>
- Espinosa, Armando. 2003. *La historia sísmica de Colombia (1550-1830)*. Armenia: Universidad del Quindío. CD-ROM.
- Espinosa R., León Darío. 2007. "El Estado en la construcción de las áreas residenciales de Bogotá". *Urbanismos* 2 (2): 67-83.
- Fopae (Fondo de Prevención y Atención de Emergencias). 2011. *Escenario de daños en Bogotá por un sismo de la falla frontal de magnitud 7.0*. Bogotá: Fopae, Grupo Escenario de Daños. <http://www.sire.gov.co/documents/13276/69801/Escenario+sismo+Magnitud+7.0+de+la+Falla+Frontal.pdf/99bf1555-291d-4ae6-8e7e-3fb90437776e>
- Gómez, Jorge, Álvaro Nivia, Nohora Emma Montes, Diana María Jiménez, María Janeth Sepúlveda, Tatiana Gao-na, Jairo Alonso Osorio, Hans Diederix, Myriam Mora y Martha Edith Velásquez, comps. 2007. *Atlas geológico de Colombia: escala 1:500.000; 26 planchas*. Bogotá: Instituto Colombiano de Geología y Minería (Ingeominas). <http://www.ingeo-minas.gov.co/Geologia/Mapa-geologico-de-Colombia/Atlas-Geologico-de-Colombia.aspx>
- Helmens, Karin y Thomas Van der Hammen. 1995. "Memoria explicativa de los mapas del neógeno y el cuaternario de la Sabana de Bogotá - cuenca alta del río Bogotá". *Análisis Geográficos* 24:91-142.
- Horton, Brian K., Joel E. Saylor, Junsheng Nie, Andrés Mora, Mauricio Parra, Andrés Reyes-Harker y Daniel Stockli. 2010. "Linking sedimentation in the northern Andes to basement configuration, Mesozoic extension, and Cenozoic shortening: Evidence from detrital zircon U-Pb ages, Eastern Cordillera, Colombia". *GSA Bulletin* 122 (9/10): 1423-1442. DOI: 10.1130/830118.1.
- IDCT (Instituto Distrital de Cultura y Turismo). 2009. *Bogotá CD: instante, memoria y espacio*. Bogotá: IDCT. <http://portel.bogota.gov.co/portel/minisites/cdturismo/showcd.htm>
- Ingeominas (Instituto Colombiano de Geología y Minería) y Universidad de los Andes. 1997. *Microzonificación sísmica de Santa Fe de Bogotá D. C.* Bogotá: Ingeominas, Universidad de los Andes.
- IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology). 2005. "1967 Huila (Colombia) Earthquake Archive". *Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS)*. <http://www.iris.edu/seismo/quakes/1967huila/>
- Maya Sierra, Tania. 2007. "Áreas residenciales y desarrollo urbano en Bogotá". *Urbanismos* 2 (2): 23-55. http://institodeestudiosurbanos.info/dmdocuments/cendocieu/coleccion_digital/Vivienda_Social_Bogota/Areas_Residenciales_Desarrollo-Maya_Tania.pdf
- Montoya, Ana Patricia. 2007. "El caso del Centro Urbano Antonio Nariño, un nuevo concepto de vivienda y vida urbana". *Urbanismos* 2 (2): 12-137. http://institodeestudiosurbanos.info/dmdocuments/cendocieu/coleccion_digital/Vivienda_Social_Bogota/Centro_Urbano_Ant_Narino-Montoya_Ana.pdf
- Montoya, Diana y Germán Reyes. 2005. *Geología de la Sabana de Bogotá*. Bogotá: Ingeominas.
- Mora, Andrés. 2007. "Inversion Tectonics and Exhumation Processes in the Eastern Cordillera of Colombia". Tesis de doctorado, Universität Potsdam, Postdam.

- Mora P., Héctor y Sergio Adrián López. 2011. "El proyecto GEORED del Ingeominas: instrumentación orientada a las investigaciones espaciales para el estudio de la dinámica terrestre en Colombia". Poster presentado en el XIV Congreso Latinoamericano de Geología: las geociencias para el desarrollo de Latinoamérica y XIII Congreso Colombiano de Geología, 29 de agosto al 2 de septiembre. Medellín: Sociedad Colombiana de Geología.
- Ordaz, Mario y Luis Eduardo Pérez R. 1997. "Microzonificación de la ciudad de México con fines de diseño sísmico de estructuras". Memorias del Seminario sobre el terremoto de Caracas del 29 de julio de 1997: 30 años después, 29 de julio al 1.º de agosto. Caracas: Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas. <http://www.funvisis.gob.ve/archivos/www/terremoto/Papers/Doco24/doco24.htm>
- Ordaz, Mario y Antonio Zeballos Cabrera. 2007. *Información para la gestión de riesgo de desastres: estudio de caso de cinco países; México*. México: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Cepal), Banco Interamericano de Desarrollo (BID). <http://www.eclac.org/publicaciones/xml/9/33659/Mexicoliviano.pdf>
- OSSO (Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroccidente Colombiano), Universidad del Valle. 2008. "Campos de información específica". *Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroccidente Colombiano-Universidad del Valle*. <http://osso.univalle.edu.co/index.php/sismologia/84>
- París, Gabriel y Jaime Romero. 1994. "Fallas activas en Colombia". *Boletín Geológico* 34 (2-3): 3-26.
- Parra, Mauricio, Andrés Mora, Carlos Jaramillo, Vladimir Torres, Gerold Zeilinger y Manfred R. Strecker. 2010. "Tectonic controls on Cenozoic foreland basin development in the north-eastern Andes, Colombia". *Basin Research* 22: 874-903. DOI: 10.1111/j.1365-2117.2009.00459.x
- Pech Pérez, Andrés, Carlos Jiménez González y Martín Cárdenas Soto. 2010. "Obtención de propiedades físicas del suelo del valle de México mediante interferometría sísmica". *Revista de Ingeniería Sísmica* 82:77-94. <http://www.smis.org.mx/rsmis/n82/Pech.pdf>
- Reinoso Angulo, Eduardo. 2007. "Riesgo sísmico de la ciudad de México". Trabajo presentado en el II Coloquio de Ingreso, 24 de mayo. México: Academia de Ingeniería, A.C. <http://academiadeingenieriademexico.mx/archivos/coloquios/2/Riesgo%20sismico%20de%20la%20Ciudad%20de%20Mexico.pdf>
- Salcedo, Elkin y Alba Nidia Castaño Castaño. 2011. "Reevaluación macrosísmica del terremoto del 12 de julio de 1785 en Colombia". *Boletín de Geología* 33 (2): 15-32.
- Salcedo, Elkin y Augusto Gómez. 2013. "Estudio macrosísmico del terremoto del 18 de octubre de 1743 en la región central de Colombia". *Boletín de Geología* 35 (1): 109-128.
- Sarabia Gómez, Ana Milena, Hernán Guillermo Cifuentes Avendaño y Kim Robertson. 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.
- Torres, Vladimir, Jef Vandenbergheand y Henry Hooghiemstra. 2004. "A Reconstruction of the Sediment Infill of the Bogotá Basin". Memorias del 2nd Colombia Biome Meeting, 4 al 5 de noviembre. Bogotá: Instituto de Ciencias Naturales-Universidad Nacional de Colombia.
- Van der Hammen, Thomas y Enrique González. 1963. "Historia de clima y vegetación del Pleistoceno superior y del Holoceno de la Sabana de Bogotá". *Boletín Geológico* 11 (1-3): 189-266.
- Velandia, Francisco, Jorge Acosta, Roberto Terraza y Henry Villegas. 2005. "The Current Tectonic Motion of the Northern Andes along the Algeciras Fault System in SW Colombia". *Tectonophysics* 399 (1-4): 313-329. DOI:10.1016/j.tecto.2004.12.028.
- Zhang, Yueqiao, Shuwen Dong y Nong Yang. 2009. "Active Faulting Pattern, Present Day Tectonic Stress Field and Block Kinematics in the East Tibetan Plateau". *Acta Geologica Sinica (English Edition)* 83 (4): 694-712. DOI: 10.1111/j.1755-6724.2009.00093.x.