

SEGMENTACIÓN SISMOGENÉTICA DE LA FALLA DE BOCONÓ A PARTIR DE INVESTIGACIONES PALEOSÍSMICAS POR TRINCHERAS, VENEZUELA OCCIDENTAL: ¿MIGRACIÓN DE LA RUPTURA HACIA EL NORESTE EN TIEMPOS HISTÓRICOS?

Franck A. AUDEMARD^{1,2}

¹ Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), Departamento de Ciencias de la Tierra, Caracas, Venezuela.

E-mail: faudemard@funvisis.gob.ve

² Universidad Central de Venezuela (UCV), Departamento de Geología, Caracas, Venezuela. E-mail: franck.audemard@ing.ucv.ve

RESUMEN

La falla de Boconó es dextral, de orientación SO-NE, y corre a lo largo de los Andes venezolanos y de la depresión del Yacuy en su porción más norte, por unos 500 km. Hasta el presente, esta falla había sido subdividida en 5 secciones (Boconó-a a Boconó-e) de suroeste a noreste, basado estrictamente en criterios geométricos. A fin de evaluar la validez de esta “segmentación” preliminar, 7 trincheras de exploración paleosísmica fueron excavadas entre 2004 y 2006, para complementar 4 otras. La integración de los resultados paleosísmicos permite establecer que: 1) La falla de Boconó sí está segmentada, como sugerido por los pocos terremotos históricos destructivos conocidos; 2) Las barreras geométricas de la segmentación original parecen realmente bloquear la propagación lateral de la ruptura, aunque algunas puedan considerarse que fugan, como entre Boconó-b y -c en 1673-1674 DC; 3) Todos los segmentos han generado sismos $\approx 7,0$ en tiempos históricos. Más aún, aparenta haber ocurrido una migración de los sismos hacia el NE durante la penúltima secuencia, entre 1610 y 1812 DC. El sismo de 1894 DC en Boconó-a ha iniciado el último ciclo, pero el próximo gran terremoto sobre la falla de Boconó parece que debiese repetirse sobre Boc-c, rompiendo la progresión que sugería el ciclo anterior. A partir de la recurrencia obtenida de trincheras, este próximo evento Ms 7,0+ debería ocurrir a fines del siglo XXI. Medidas preventivas, particularmente en el componente social, deberían acelerarse en esa región para estar mejor preparados para ese futuro evento.

Palabras clave: *Sismotectónica, paleosismología, falla activa, falla de Boconó, Andes de Mérida, Venezuela*

ABSTRACT

Seismogenic segmentation of the Boconó fault from paleoseismic trench investigations, western Venezuela: NE-directed rupture Migration in historical times?

The Boconó fault is a seismogenically-active right-lateral strike-slip fault that extends for over 500 km, in a SW-NE direction, mainly along the backbone of the Mérida Andes, but also along the northern margin of the Yacuy depression. So far, this fault had been previously subdivided into 5 sections (Boconó-a through -e from SW to NE) based strictly on geometric criteria. In order to assess the reliability of this preliminary “segmentation”, 7 paleoseismic trenches have been excavated between 2004 and 2006 to complement 4 previous assessments. The integration of all trench results allows to determining that: 1) The Boconó Fault is actually segmented, as initially suggested by the few large, known, destructive historical earthquakes; 2) the geometric segment boundaries appear to be actual seismogenic barriers to rupture propagation, thus supporting the existing preliminary segmentation, although some may be “leaky” boundaries (between Boconó-b and -c in 1674 AD); 3) all segments appear to have ruptured in historical times. Furthermore, it appears that there is a northeastward time and space migration of the before-the-last event sequence (similar to the North Anatolian fault in Turkey), starting in 1610 AD on Boconó-a and closing the cycle on Boconó-e in 1812 AD. Segments Boconó-b and -c broke during the 1673-1674 earthquakes sequence (similar to the Izmit and Duzce 1999 events) and Boconó-d would seem to have ruptured during the 1736 AD earthquake, which is a poorly documented event although significant damage to Barquisimeto (at NE tip of Boconó-d) was reported. Should this cycle repeat in the future, the 1894 event on Boconó-a has started a new cycle and the repeat of the 1674 event should be the next large shock on the Boconó fault. Based on the recurrence determined from trenching, the next \approx Ms 7.0 event on Boconó-c should occur in a time window between year 2070 and 2130 AD. Mitigation, particularly as to the social component, should be developed in preparation for a future event of such characteristics in the central Mérida Andes.

Keywords: *Seismotectonics, paleoseismology, active fault, Boconó fault, Mérida Andes, Venezuela*

INTRODUCCIÓN

La región andina venezolana ha sido reconocida como el seno de grandes terremotos destructores en su pasado histórico (e.g., Centeno Graü 1940, Fielder 1961, Grases *et al.* 1999). Rod (1956a) adscribe la gran mayoría de los más importantes a la falla de Boconó. Por otra parte, Cluff y Hansen (1969) le adjudican tanto los principales sismos históricos como instrumentales (contemporáneos). Particularmente, estos autores le acreditan a la falla de Boconó los sismos de 1610, 1812, 1894, 1932 y 1950. Adicionalmente a los eventos de 1610, 1812 y 1894, Aggarwal (1983) -posteriormente citado textualmente por McCann y Pennington (1990) y Suárez y Nábelek (1990)- también le asignan los sismos de 1644 y 1875. No obstante, son pocos los sismos antes indicados que tienen actualmente claras asociaciones simotectónicas con la falla de Boconó. A título ilustrativo, Grases (1990) indica una probable asociación del sismo de El Tucuyo de 1950 con la falla de Boconó; de igual manera lo hicieron Cluff y Hansen (1969). Sin embargo, Choy (1998) y Audemard *et al.* (1999b) proponen que otras fallas cercanas pudiesen potencialmente ser también la fuente de ese evento, dada la complejidad estructural que presenta la región epicentral ubicada al oeste de la falla de Boconó. Igualmente, Singer y Beltrán (1996) asocian los sismos de Pamplona de 1644 y de Cúcuta de 1875 con el indenter de Pamplona (referirse a Boinet 1985, para la definición de esta estructura; Fig. 1), y este último evento lo adscriben a la falla de Aguas Calientes, la cual es una falla paralela y al norte de la falla de Boconó, en proximidad a la frontera colombo-venezolana (Fig. 2). A fin de reducir las ambigüedades aún existentes en cuanto a la relación causa-efecto entre la falla de Boconó y estos sismos destructores históricos, entre otros objetivos igualmente propuestos (e.g. potencialismogénico de la falla de Boconó expresado en términos de sismos máximo probables y sus períodos de retorno, cinemática de la falla, segmentación de la falla, entre otros), FUNVISIS ha llevado un programa de excavación de

trincheras de evaluación paleosísmica en los últimos 25 años, iniciados en proximidad a la frontera colombo-venezolana, en el estado Táchira en el año 1986 (Audemard y Soulas 1995, Audemard 1997, 1998, Audemard *et al.* 1999a, Audemard 2003a, 2005), que posteriormente recibió un fuerte apoyo financiero del gobierno nacional en el presente siglo por intermedio de un proyecto FONACIT (Bueno *et al.* 2005, Ollarves *et al.*, 2005, Alvarado *et al.* 2007, 2008, Alvarado 2008, Audemard 2008, Audemard *et al.* 2008, Alvarado *et al.* 2009, Audemard 2009c, Bueno 2009, Audemard 2010), ejecutado en las diferentes secciones o segmentos de la falla de Boconó propuestos por Audemard *et al.* (2000).

De manera paralela, colegas especialistas de la sismología histórica se han igualmente interesado en reducir los niveles de incertidumbre en la relación causal de los grandes sismos históricos andinos venezolanos, esencialmente a partir del análisis de intensidades macrosísmicas. Particular mención amerita los trabajos de: Rengifo y Laffaille (1998, 2000) en lo atinente al Gran Terremoto de los Andes Venezolanos de 1894, Palme y Altez (2002) sobre los sismos de 1673-1674, y Altez (2005) y Choy *et al.* (2010) en referencia al sismo del 23 de marzo de 1812. Excelentes resultados parecen arrojar los estudios (Palme y Altez 2002, Choy *et al.* 2010) que han usado, adaptado y mejorado el método desarrollado por Bakun y Wentworth (1997), para la determinación de las magnitudes y el refinamiento de los epicentros macrosísmicos de los sismos de 1673-1674 y 1812 respectivamente (centros de intensidad reportados en la Fig. 2). Palme *et al.* (2005) también aplican esta misma metodología, pero a una población de sismos más grande y diversa, que igualmente incluye a sismos instrumentales y otras regiones de la geografía venezolana.

Otro esfuerzo, de manera independiente, de asociación sismogénica para la falla de Boconó es llevado a cabo por Audemard (2002), quien partiendo sobre la aplicación del concepto de *gap* o silencio sísmico, propone la ubicación y extensión lateral de las rupturas asociadas a los sis-

mos de 1812 (a lo largo del valle del Yacuy y a lo largo de la costa norcentral en su sector occidental) y 1894 (a lo largo del sector venezolano más meridional) exclusivamente a partir de la simple lectura visual de la sismicidad instrumental nacional registrada y catalogada por FUNVISIS durante el período 1910-1999.

El presente artículo no pretende ser una revisión exhaustiva de esos estudios paleosísmicos individuales, pero si persigue discutir los últimos grandes sismos históricos acontecidos en proximidad a la falla de Boconó y que pueden serle atribuidos a partir de los resultados de estos estudios geológicos. Por limitaciones propias a los métodos de evaluación paleosísmica por trincheras (ver Audemard 2003a, 2005, Audemard y Michetti, 2011), conocido que sólo los más grandes terremotos pueden sus rupturas cosísmicas alcanzar la superficie, sólo los sismos históricos de mayor tamaño, magnitud igual o superior a Ms 7,0, serán aquí tratados. De manera paralela, esta evaluación simotectónica, a partir de sismos históricos asociados por intermedio de trincheras paleosísmicas, permite evaluar la segmentación simogénica de la falla de Boconó.

LA FALLA DE BOCONÓ

La falla de Boconó es un accidente transcurrente dextral que se extiende por más de 500 km en el occidente venezolano (Fig. 1), en dirección SO-NE, entre la población de San Cristobal (SC), ubicada en proximidad de la frontera con Colombia, y la población de Morón (Mo), en la costa caribeña de golfo Triste (Fig. 2; e.g., Rod 1956b, Schubert 1982, Soulas 1986, Beltrán 1994, Audemard *et al.* 2000). Esta falla de alrededor de 500 km de largo, surca los Andes de Mérida sobre una longitud próxima a 400 km. La figura 1 muestra como en su extremidad sur, la falla se conecta con el sistema de piedemonte llanero colombiano (CLFFS: *Colombian Llanos Foothills Fault System*) a través del sistema de fallas de Bramón-Chinacotá, de orientación NO-SE, luego de sufrir dos inflexiones en ángulo recto opuestas; Estructura conocida como el inden-

tor o punzón de Pamplona (Boinet 1985; Fig. 1). Por otra parte, la falla tuerce 45° en forma horaria en su otro extremo, para conectarse con grandes fallas dextrales de dirección este-oeste que corren al norte de Venezuela continental (con la falla de San Sebastián y ésta a su vez con la de El Pilar; Fig. 1). La falla de Boconó actualmente aparenta tener un rol preponderante en la fragmentación de bloques tectónicos mayores y en la tectónica de escape imperante en el noroeste de Suramérica, limitando directamente el bloque triangular de Maracaibo por el sureste (Fig. 1; e.g., Audemard 2002, 2009b, Audemard y Audemard 2002).

Dentro de los Andes de Mérida (Fig. 2), la falla en su sector septentrional corre aproximadamente en posición axial, mientras está claramente desplazada hacia el norte al sur de Mérida (Me; Audemard y Audemard 2002, Audemard 2003b). No obstante, en toda su longitud andina está siempre realizanda por el alineamiento continuo de grandes valles de diversos ríos (e.g., Turbio, Boconó, Santo Domingo, Chama, y Mocotíes, entre otros, del NE al SO). Esta falla ha sido reconocida, cartografiada y caracterizada desde el trabajo pionero de Rod (1956b), sobre la base del gran número de evidencias geomórficas de fallamiento activo presentes a lo largo de la totalidad de su traza (e.g., Schubert 1980, 1982, Soulas 1985, Soulas *et al.* 1986, 1987, Audemard 2009a). Además de los grandes valles lineales antes mencionados con anchura variable entre 1 y 5 km, se identifican, de manera reiterada, cuellos y ensilladuras de falla, trincheras, lagunas de falla, escarpes de falla, lomos lineales y lomos de obturación a lo largo de su(s) traza(s) activa(s). Muy particularmente, la falla se expresa morfológicamente de manera espectacular a cotas superiores a los 3000 m en ambientes glaciares y periglaciares (Schubert 1982, Soulas 1985, Ferrer 1991, Audemard 2009a), y en especial en la cuenca en tracción de Apartaderos (tal como definida por Audemard *et al.* 1999a), en la divisoria de aguas de los ríos Chama y Santo Domingo (ubicada en los sitios de trincheras T3 y T5 en Fig. 3), donde se combina de manera aditiva su máxi-

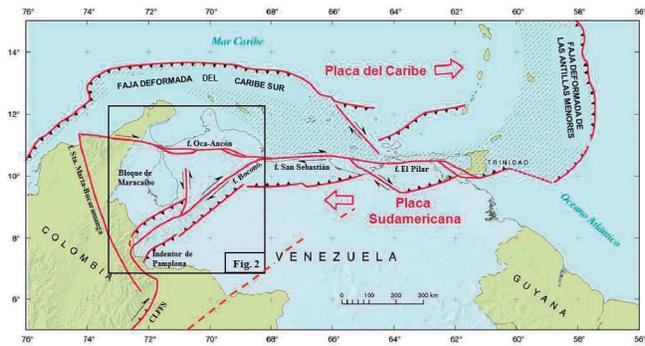


Figura 1: Marco geodinámico simplificado del límite sur de la placa Caribe (modificado de Audemard *et al.* 2000).

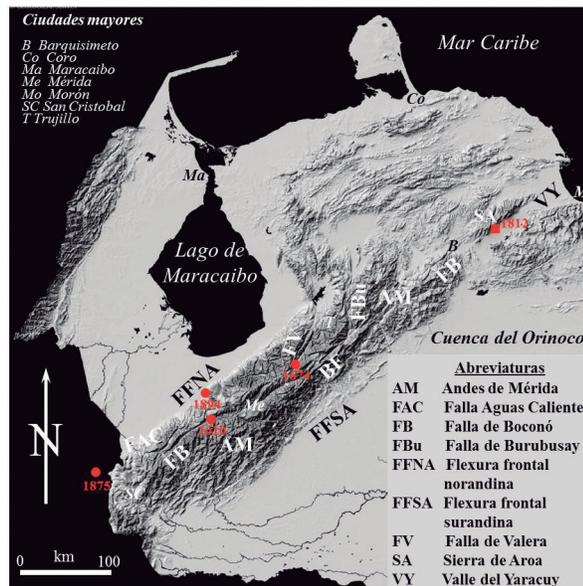


Figura 2: Expresión morfológica de la falla de Boconó en mapa de relieve de Venezuela (Mapa base según Garrity *et al.* 2004). También se indican las otras fallas regionales activas más importantes, al igual que algunas localidades de interés. A título de referencia, se ha incorporado los centros de intensidades de algunos sismos históricos andinos y de la depresión de Yaracuy. Aquellos con epicentros representados por círculo provienen de Palme *et al.* (2005), mientras que el indicado por un cuadrado es de Choy *et al.* (2010).

ma tasa de deformación tectónica con los agentes morfoclimáticos presentes menos agresivos.

Aunque este accidente tectónico puede seguirse casi ininterrumpidamente sobre una longitud superior a 500 km, la falla de Boconó no es un rasgo continuo desde el punto de vista tectónico, tal como lo plantean Audemard *et al.* (2000), al subdividirla en 5 secciones, preliminarmente distinguidas por subíndices alfabéticos (Boc-a a Boc-e; Fig. 3). El criterio empleado por estos autores para su subdivisión reposa esencialmente en irregularidades o discontinuidades de orden geométrico, que concuerdan mayoritariamente con estructuras tectónicas reconocidas como cuencas en tracción (de Lagunillas: explorada sus fallas limítrofes por T10 y T11; Apartaderos: explorada por T3 y T5; y Cabudare: al sur de Barquisimeto, del SO al NE); a excepción de la barrera entre los

segmentos Boc-c y Boc-d, en proximidad a la población de Boconó, que es de tipo transpresivo (Fig. 3). En igual sentido, se puede aseverar que tampoco es un único rasgo en lo sismogénico. Del análisis de los grandes sismos históricos andinos, se puede percibir que las isosistas VIII o más (Fig. 3); así como los epicentros macrosísmicos propuestos para muchos de ellos no coinciden geográficamente (Figs. 2 y 3; e.g., Soulas *et al.* 1987 en Audemard 1997, Grases 1990, Palme y Altez 2002, Palme *et al.* 2005, Choy *et al.* 2010); por lo que no pueden ser considerados repeticiones unos de otros. Por ende, la combinación de ambos aspectos -geométricos y sísmológicos- permitía presagiar la posible segmentación sismogénica de la falla de Boconó, donde cada segmento debiese tener una historia sísmica propia, por lo que se planteó corroborar esta hipótesis a través de la excavación de una serie de

trincheras de evaluación paleosísmica estratégicamente ubicadas.

Esta segmentación parece igual reflejarse en su tasa de movimiento, lo cual es otro de los criterios para segmentar fallas (referirse a Audemard y Singer 1996). El desplazamiento lateral derecho de complejos morrénicos del último máximo glacial (localmente nombrado Glaciación Mérida Tardía por Schubert 1974) en la región de Apartaderos, permiten estimar la tasa de desplazamiento de la falla de Boconó que limita la cuenca en tracción de Apartaderos durante el Cuaternario tardío en 2,3-3,0 mm/a para el ramal norte, y en 5,0-7,7 mm/a para el sur, representando aproximadamente el 25 y 75% de los 7 a 10 mm/a de la tasa de desplazamiento total de la falla de Boconó en los últimos 15 \pm 2 ka (Audemard *et al.* 1999a). Esta tasa total de movimiento es esencialmente consistente con la velocidad de 10 mm/a predicha por los modelos de placas tectónicas, asumiendo que la falla de Boconó es el límite de placas entre el Caribe y Sudamérica (e.g., Molnar y Sykes 1969, Minster y Jordan 1978), a partir de marcadores geológicos (e.g., Soulas 1986), y de mediciones vectoriales más recientes de posicionamiento global (e.g., Freymueller *et al.* 1993, Trenkamp *et al.* 2002, Pérez *et al.* 2011). De este valor máximo en la región central andina, la velocidad de la falla de Boconó decrece hacia sus extremos. Hacia el SO, la tasa de desplazamiento promedio desciende a $5,2 \pm 0,9$ mm/a entre Mérida y San Cristobal (Audemard 1997) y a tanto como a 1 mm/a en la frontera colombo-venezolana (Singer y Beltrán 1996). Esta tasa aparentemente menor puede deberse al efecto conjugado de: a) acomodo del movimiento en acortamiento en el indentor de Pamplona, b) distribución de la cinemática entre tres trazas activas de la falla de Boconó en los Andes venezolanos meridionales, en proximidad a San Cristobal, y c) acomodo de transcurrancia dextral en otras fallas activas subparalelas igualmente dentro del volumen andino. De igual manera, ramificaciones de la falla y fallamiento activo subparalelo podrían ser la causa de la pérdida de velocidad de la



Figura 3: Ubicación relativa de las excavaciones paleosísmicas realizadas entre 1986 y 2006 sobre la falla de Boconó (según Audemard 2008, 2010). Se muestra igualmente la segmentación de esta falla mayor propuesta por Audemard *et al.* (2000), así como las isosistas de intensidad VIII o superior de los principales sismos históricos discutidos en este trabajo. Se muestra tal isosista porque ésta es representativa de la longitud de ruptura del sismo responsable.

falla de Boconó (1,5-3 mm/a) reportada por Casas (1991), en el valle del Yaracuy. Del análisis de los vectores cinemáticos del norte de Suramérica publicados (e.g., Freymueller *et al.* 1993, Trenkamp *et al.* 2002, Pérez *et al.* 2011), se desprende que el bloque de Maracaibo se escapa hacia el NNE más rápido que el resto del bloque norandino (territorio que comprende la cadenas andinas colombianas y ecuatorianas; Audemard 2003b, 2009b), lo cual permite expresar que el sistema de fallas del piedemonte llanero colombiano no tiene una tasa de desplazamiento similar a la FB, siendo necesariamente del orden milimétrico por año (\ll 10 mm/a).

NUEVAS EXCAVACIONES PALEOSÍSMICAS

A fin de probar la validez de la segmentación preliminar de la falla de Boconó propuesta por Audemard *et al.* (2000; Fig. 3), debía cubrirse cada uno de estos segmentos o secciones con al menos una excavación paleosísmica por sección. Antes de iniciarse el presente estudio, la falla de Boconó ya contaba con cuatro evaluaciones paleosísmicas (Audemard 2005; Fig. 3): Las trincheras de Mis Delirios (T1) y La Grita (T2; sección Boc-a; Audemard y Soulas 1995, Audemard 1997, 1998), La de Morro de Los Hoyos (T3; sección

Boc-b; Audemard *et al.* 1999a) y la trinchera de Buena Vista (T4; sección Boc-d; Beltrán *et al.* 1990), quedando dos secciones (Boc-c y Boc-e) sin reconocimiento similar alguno previo (Fig. 3). Durante el presente estudio, finalmente se excavaron 7 nuevas trincheras (T5 a T11 en Fig. 3), para totalizar 11 (Audemard, 2008). Todos los sectores contaron con al menos una trinchera, y cuatro de las 5 secciones de la falla tuvieron al menos dos (Fig. 3): Frontera colombo-venezolana-Lagunillas (sector Boc-a, con 3 evaluaciones), Lagunillas-Apartaderos (sector Boc-b), Boconó-Barquisimeto (-Andes septentrionales-; sector Boc-d, con 3 excavaciones) y valle del Yaracuy entre Yaritagua y Puerto Cabello (sector Boc-e, con 2). Es decir, que sólo la sección Boc-c tuvo una única evaluación, pero tal sección de la falla recibió una atención especial al estudiarse los lagos activos y fósiles de la región de Mucubají con los mismos fines paleosísmicos pero con otro enfoque distinto y complementario (referirse a Carrillo 2006, Carrillo *et al.* 2006, Audemard, 2008, Carrillo *et al.* 2008, para mayores precisiones). Dichas excavaciones fueron de tamaño variable, pero nunca superior a los 15 m de largo x 2,5 m de ancho x 2,5 m de profundidad. Se excavaron sobre tres años (período 2004-2006), siempre en el lapso entre noviembre del año anterior

y abril del año siguiente (período seco o menos lluvioso).

En definitiva, las nuevas trincheras estudiadas se distribuyeron de la siguiente manera a lo largo de la falla de Boconó (Fig. 3): a) Sección Boc-a: Trincheras La Pantaleta (T10, Cuenca en tracción de Lagunillas; en traza norte); b) sección Boc-b: Trincheras Quinanoque (T11, Cuenca en tracción de Lagunillas; en traza sur); c) sección Boc-c: Trincheras Mesa del Caballo (T5, Cuenca en tracción de Apartaderos; en traza sur); d) sección Boc-d: Trincheras La Primavera (T6) y Los Manzanos (T7); y e) sección Boc-e: Trincheras de Yaritagua (T8) y Quigua (T9).

PRINCIPALES SISMOS HISTÓRICOS IDENTIFICADOS

La presentación de los resultados se hará a continuación por sección, comenzando por el segmento más suroccidental de la falla de Boconó, combinando los resultados arrojados por las 11 evaluaciones paleosísmicas ejecutadas entre 1986 y 2006.

Sección Boc-a (segmento La Grita)

El segmento Boc-a, aquí renombrado Segmento La Grita, que se extiende en dirección noreste desde la proximidad de la frontera colombiana hasta la margen norte de la cuenca en tracción de Lagunillas, cuenta con tres exploraciones paleosísmicas: Las trincheras La Pantaleta (T10) en Lagunillas, La Grita (T2) en la localidad homónima (cerca al hotel La Montaña) y Mís Delirios (T1) en proximidad a Cordeiro (Fig. 3); las dos últimas siendo evaluaciones realizadas en los años 1986-1987 (Audemard 1997, 2005).

La región meridional de los Andes de Mérida sufrió del embate de varios grandes terremotos en tiempos de la colonia, ameritando especial mención los sismos de 1610, 1644, 1875 y 1894 (e.g. Grases *et al.* 1999). Por una parte, Singer y Beltrán (1996) proponen a la falla de Aguas Calientes como la responsable de los eventos de 1644 y 1875. Por la otra, Lugo (en Soulas *et al.* 1987) parece sugerir, a través de los mapas de intensidades sísmicas

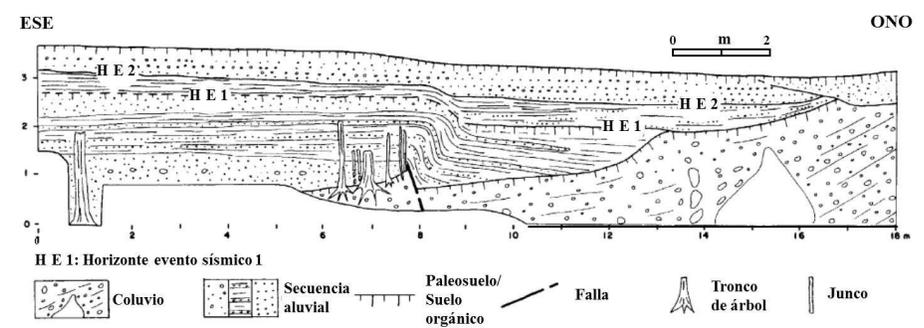


Figura 4: Levantamiento geológico de la pared suroeste de la trinchera La Grita (T2; tomado de Audemard 1997). Se realizan los horizontes evento 1 y 2 (HE 1 y 2), que fueron interpretados como los sismos de Mocotíes de 1610 y el Gran Terremoto de Los Andes Venezolanos de 1894, respectivamente.

construidos a partir del análisis crítico de las numerosas descripciones de los daños ocurridos a consecuencia de los sismos de 1610 y 1894, que los epicentros macrosísmicos de estos dos otros eventos pudieran estar asociados con la falla de Boconó (Fig. 3).

En 1986, FUNVISIS excava sobre la falla de Boconó una trinchera de evaluación paleosísmica (T2), ubicada unas centenas de metros al noreste del Hotel La Montaña, estado Táchira. De la interpretación de la información geológica recabada en dicha trinchera (Fig. 4), luego de la datación de diversos niveles sedimentarios de referencia por el método ^{14}C convencional, se establece la ocurrencia de dos terremotos, uno en 355 ± 45 a AP (AP = antes del año 1950 DC) y otro más reciente que 150 a AP; es decir que el más viejo de los dos ocurrió entre 1550 y 1640 DC (1595 ± 45 DC) y el último reportado es posterior a 1800 DC (Audemard y Soulas 1995). En consecuencia, se pudo entonces confirmar la asociación sismotectónica de los terremotos de La Grita del 03-II-1610 y del Gran Terremoto de los Andes Venezolanos del 28-IV-1894 con el segmento de la falla de Boconó evaluado.

Por su parte, la evaluación paleosísmica de ambas paredes de la trinchera La Pantaleta (Fig. 5), ubicada hacia el extremo noreste de la sección Boc-a de la falla de Boconó (T10 en Fig. 3), permitió identificar al menos seis (6) sismos, con fechas de ocurrencia: 1894 DC, 1610 DC, 1080 DC, 900 AC, 1675 AC y 2335 AC (Alvarado 2008). En esta trinchera se han identificado claramente dos deformaciones que

temporalmente pueden ser atribuidas a los sismos históricos de 1610 y 1894 (Fig. 5). Esta evaluación confirma los dos únicos sismos, ambos históricos, reconocidos en la trinchera de La Grita (T2) por Audemard (1997 y 1998), precisando que estos dos eventos definitivamente ocurrieron en el segmento La Grita (Boc-a), y cuyas rupturas de superficie deben extenderse hacia el noreste, al menos hasta el relevo transtensivo de Lagunillas, tal como lo postulase Audemard *et al.* (2000). Se desconoce aún si las dos longitudes de rupturas son similares. Sin embargo, las magnitudes derivadas para cada uno de estos sismos por Palme *et al.* (2005), usando el método Bakun-Wenworth, sugerirían que si lo fuesen. A igual conclusión se llegaría si se considera que las deformaciones medidas en la trinchera La Grita (T2) para cada uno de los sismos de 1610 y 1894 por Audemard (1997), es de 30 cm en la componente vertical cada vez, lo cual permite estimar su magnitud M_s en al menos 7,1-7,3, usando las relaciones empleadas por FUNVISIS en aquellos tiempos (ver Audemard y Singer 1996, para mayores detalles sobre la metodología y formulación empleada).

Aún después de Audemard (1997) haber confirmado la asociación de estos dos sismos históricos con el Segmento La Grita (Boc-a) de la falla de Boconó por vía geológica, algunos trabajos (Rengifo y Laffaille 1998, 2000, Palme *et al.* 2005) todavía postulan que el centro de intensidades del sismo de 1894 se encuentra hacia el flanco norandino (Fig. 2), lo cual solicita de cierta prudencia en el empleo de la distribu-

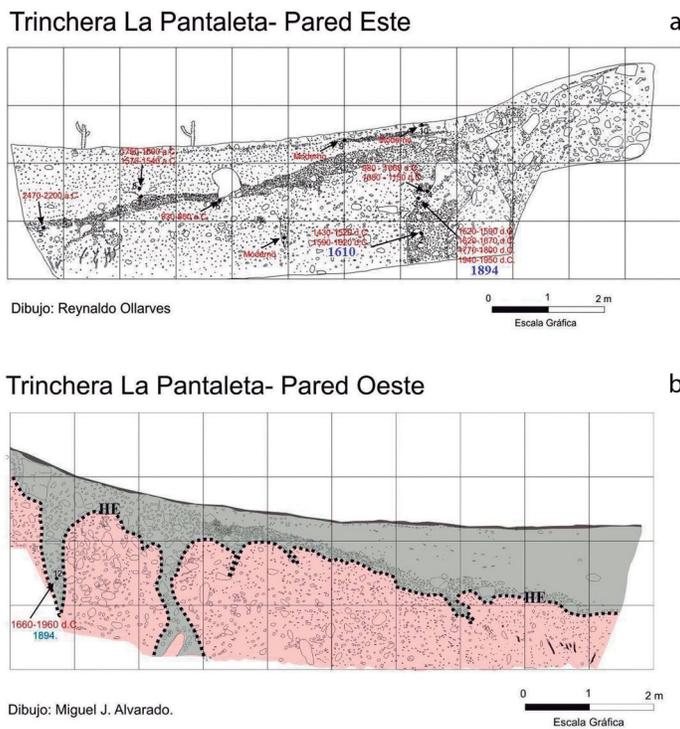


Figura 5: Levantamiento geológico de la trinchera La Pantaleta (T10; tomado de Alvarado 2008). a) Pared Este (dibujo por Reynaldo Ollarves). b) Pared Oeste (dibujo por Miguel Alvarado). Se realiza el horizonte evento correspondiente al Gran Terremoto de Los Andes Venezolanos de 1894.

ción de los daños (en la población, medio construido y medio natural) como única aproximación para el establecimiento de asociaciones simotectónicas certeras, tal como postulan Rodríguez y Audemard (2003).

Dada la complejidad estructural de la falla de Boconó, que se ramifica en al menos tres trazas activas subparalelas y que distribuyen la actividad reciente de la falla en este sector más meridional de los Andes de Mérida (Singer y Beltrán 1996, Audemard 1997, Audemard *et al.* 1999a, Audemard y Audemard 2002, Audemard 2003b), la trinchera Mis Delirios (T1), excavada en la porción más suroeste de este segmento Boc-a de la falla de Boconó, en la localidad de Cordero, en 1987, evaluó la actividad sísmica de la traza central de las 3 presentes en la región, sin conseguir las rupturas cosísmicas de los sismos de 1610 y 1894. Por consiguiente, se desconoce si las rupturas de estos sismos se extienden de hecho tan al sur, por lo que al presente y en función de la información disponible y recopilada, no se puede aseverar que el segmento La Grita (Boc-a) sea un seg-

mento sísmogénico que se rompa íntegramente durante un único evento. Cabe igualmente la posibilidad que la ruptura durante esos sismos históricos no alcanzase la superficie por estar aproximándose a los extremos de la ruptura cosísmica.

Sección Boc-b (segmento Mucuchíes)

En la región de la población de Lagunillas (estado Mérida), la falla de Boconó presenta dos trazas (Boc-a y Boc-b; Fig. 3). Éstas están dispuestas en un relevo trans-tensivo de casi una decena de kilómetros de solape y 1,5 km de separación, delimitando la cuenca en tracción homónima, la cual contiene la laguna de Urao (e.g.; Tri-cart y Michel 1965, Alvarado 2008). Sobre la traza sur limítrofe de la cuenca en tracción de Lagunillas (extremo más suroccidental del Segmento Mucuchíes o Boc-b), al oeste de la laguna de Urao, se excavó y estudió la trinchera de Quinanoque (T11 en Fig. 3). El evento más reciente interpretado de esta evaluación paleosísmica es el de 1674 DC (Fig. 6; Alvarado *et al.* 2008, 2009). Se le atribuye a este evento los daños reportados en San Antonio de

Mucuñó, ubicado al sur de la cuenca de Lagunillas y de Las González, que a la postre conllevaría a su abandono y relocalización a unas pocas decenas de metros colina arriba (Laffaille *et al.* 2008, 2010). Una excavación previa, en la localidad de Morro de Los Hoyos (T3), había conllevado a otra evaluación paleosísmica en el otro extremo de este segmento Mucuchíes (Boc-b) de la falla de Boconó (Audemard *et al.* 1999a). Estos autores interpretan que la ocurrencia del sismo más reciente sobre este Boc-b está restringida a los últimos 2000 años, lo cual conllevaba un muy alto nivel de incertidumbre. Como hipótesis de trabajo previa a esta excavación, se había planteado que el sismo histórico que podía ser reconocido en la trinchera de Morro de Los Hoyos (T3) fuese el de 1812 DC, en función de los estudios macrosísmicos disponibles en 1997, al momento de la excavación (Fiedler 1961, Lugo en Soulas *et al.* 1987, Altez 1998, entre otros). Es sólo después de la excavación de la trinchera de Mesa del Caballo (T5) en 2004 (Audemard *et al.* 2008) y los estudios previos sobre el sismo de 1674 (Palme y Altez 2002 y Palme *et al.* 2005), que se logra hacer la asociación simotectónica, tal como veremos más adelante.

Sección Boc-c (segmento Santo Domingo)

En la excavación sobre la traza sur de la falla de Boconó, que delimita la cuenca en tracción de Apartaderos (tal como la definen Audemard *et al.* 1999a), en la localidad de la Mesa del Caballo (T5 en Fig. 3), Audemard *et al.* (2008) logran establecer que el último evento aparenta haber ocurrido alrededor del año 1700 y es común a ambas trincheras (T3 y T5 de la Fig. 3).

El único sismo histórico, con características que pudiesen satisfacer esta localidad epicentral y una magnitud de dicho orden, es la secuencia de sismos de 1673-1674, cuya isosista VIII se extiende paralelo a la falla de Boconó por casi 130 km (Fig. 3; según estudio macrosísmico de Palme y Altez 2002), a lo largo de las secciones Boc-b y Boc-c de esta falla. Tomando en cuenta que este sismo se conoce como

una serie sísmica compuesta ocurrida entre 1673 y 1674, donde más de un sismo principal parece haber ocurrido (Palme y Altez 2002), Audemard *et al.* (2008) han propuesto que esta serie de eventos hayan roto a lo largo de ambos ramales de la falla de Boconó que bordean la cuenca de Apartaderos (Boc-b y Boc-c), disparando un segmento al otro en cuestión de días o semanas, hasta de muy pocos meses. Esto explicaría la amplia distribución de deslizamientos en la vertiente norte de los Andes de Mérida y de daños reportados al medio construido desde la población de Mérida hasta la de Trujillo (separadas casi 150 km; Fig. 3). Esta interpretación tiene corroboración hacia el suroeste, como discutido previamente, dado que este evento es igualmente identificado por Alvarado (2008) en la trinchera Quinanoque (T11), la cual está ubicada en el extremo más suroeste de la sección Boc-b o segmento Mucuchíes (Fig. 3).

También de la investigación paleosísmica desarrollada en Mesa del Caballo (T5), Audemard *et al.* (2008) postulan que ambas trazas de la falla de Boconó que delimitan la cuenca de Apartaderos, con base en sus intervalos de recurrencia individuales (1100-1350 años para la traza norte y 450 años para la traza sur), es concebible que ambas trazas se mueven de forma conjunta cada 1200-1350 años, mientras que la traza sur (Boc-c), más rápida (7,5 mm/a en la región de Apartaderos), recurre con dos sismos intercalados entre los sismos comunes a ambas trazas (Boc-b y Boc-c). la secuencia de sismos de 1673-1674 sería simultánea a ambas trazas. Un evento de características similares a los más frecuentes debería esperarse en el segmento Boc-b o Boc-c (segmentos Mucuchíes o Santo Domingo) dentro de unos 100 años (Audemard *et al.* 2008, Audemard 2009c, 2010).

Sección Boc-d (segmento Guarico)

Sobre este segmento, en proximidad a Barquisimeto, en el año 1987 se ejecutó una evaluación paleosísmica en la localidad de Buena Vista (San Miguel; T4 en Fig. 3), que permitió establecer la presencia y la actividad holocena de la falla de

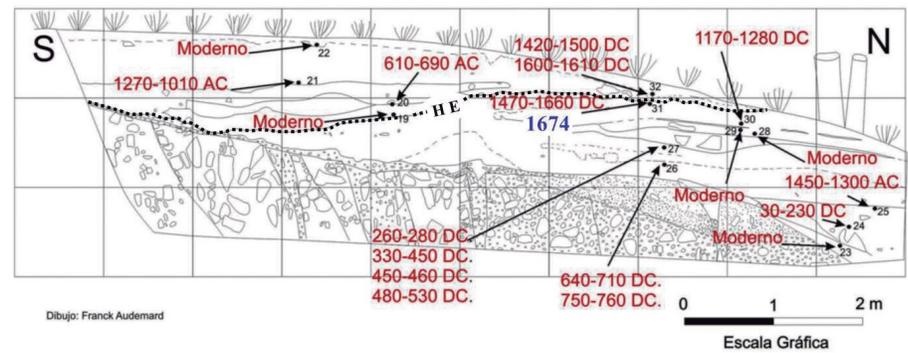


Figura 6: Levantamiento geológico de la pared oeste de la trinchera Quinanoque (tomado de Alvarado 2008; dibujo por Franck Audemard). Se señala el horizonte evento correspondiente a la secuencia de 1673-1674.

Boconó en esta región, pero sin mayores detalles en cuanto a su historia sísmica (Beltrán *et al.* 1990, Audemard 2005). Por lo antes expuesto, se decidió realizar al menos dos excavaciones en este sector poco conocido. En tal sentido, se realizaron dos trincheras, cercana una a la otra (no más de 2 km de separación), al noreste de la población de Guarico, nombradas trincheras La Primavera (T6) y Los Manzanos (T7).

La evaluación paleosísmica de la trinchera La Primavera (T6 en Fig. 3), realizada en 2005, arrojó la identificación de 5 a 6 sismos, algunos representados por cuñas coluviales tipo línea de cantos (Stone-line; Fig. 7): 55AC \pm 115, 365 DC \pm 245 (y/o 400 DC \pm 140), 965 DC \pm 185, 1525 DC \pm 105 y 1705 DC \pm 215, con una recurrencia que oscila entre los extremos de 180 y 600 años, pero con un claro predominio entre 500-600 años (Audemard 2008).

Por su parte, la evaluación paleosísmica de la trinchera Los Manzanos (T7 en Fig. 3) arrojó la identificación de igual número de sismos, 5 a 6 sismos: 15 DC \pm 75, 155 DC \pm 525 (y/o 595 DC \pm 185), 1200-1280 DC, 1225 DC \pm 205 y 1630 DC \pm 330, con una recurrencia que oscila entre los extremos de 140 y 600 años, sin un claro predominio de algún valor (Audemard 2008).

En referencia al último sismo ocurrido en esta sección Boc-d, este evento es probablemente histórico, porque es más joven que 1300 DC (1630 DC \pm 330); y más reciente que 1500 DC (1705 DC \pm 215) para el estudio en T6. Son pocos los sismos

históricos conocidos que afectaron esta región que pudiesen considerarse potenciales candidatos: 1674, 1736, 1775, 1801, 1812, entre otros. El evento ocurrido sobre este segmento debería haber producido daños en las principales ciudades de la época, ameritando mención especial Trujillo como Barquisimeto; la primera por su proximidad al extremo suroeste del segmento y Barquisimeto por encontrarse justo al extremo opuesto del segmento Boc-d.

Según estudios previos de sismología histórica, el sismo de 1812, a partir de la distribución de daños reportados por Rodríguez y Audemard (1997) y Altez (2005) para este evento, debería más bien asociarse al segmento San Felipe (Boc-e) de la falla de Boconó (Fig. 3), como lo demostraremos más adelante en este trabajo. Esto es confirmado por Choy *et al.* (2010; Fig. 2). Por su parte, Palme *et al.* (2005) sugieren que el evento de 1775 debería asignarse a fallas en posición más norte que la falla de Boconó, proponiendo como potencial fuente a la Falla de Burbusay o San Lázaro, restando como últimos candidatos los sismos de 1674 y 1736. El evento de 1736, es poco conocido, pero se sabe de su existencia justamente por los daños producidos en Barquisimeto (Grases *et al.* 1999). Podría ser un fuerte candidato a último evento en este segmento Guarico (Boc-d), en tiempos históricos. En el caso que el sismo de 1674 fuese el evento identificado en estas evaluaciones de la región de Guarico, implicaría que este sismo, más precisamente esta secuencia de

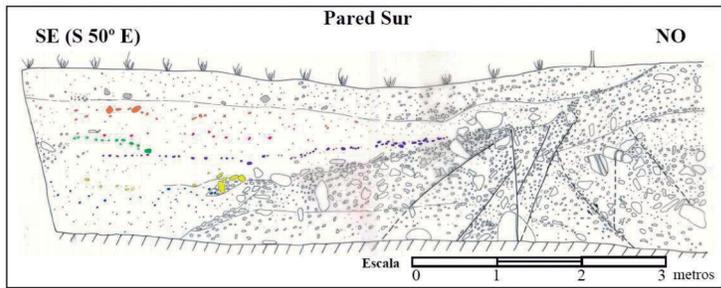


Figura 7: Levantamiento geológico de la pared suroeste de la trinchera La Primavera (T6; tomado de Bueno *et al.* 2005 y Audemard 2008; dibujo por Reinaldo Ollarves). Cada línea de piedra (*stoneline*) es un horizonte evento.

sismos, habría roto en pocas semanas tres segmentos contiguos de la falla de Boconó (Boc-b, Boc-c y Boc-d). Esto podría justificarse porque Palme *et al.* (2005) asignan una magnitud de $7,40 \pm 0,63$ a este evento, aplicando el método de Bakun-Wenworth, que debe resultar de una muy extendida distribución de los daños a lo largo de la falla de Boconó (ver isosista VII-VIII en Fig. 3); mientras que debería re-evaluarse considerando que podría ser una concatenación de sismos de magnitudes más moderadas (próximas a Ms 7,0), de manera similar al sismo de 1812. No obstante, Barquisimeto no aparenta haber tenido daños mayores durante este evento de 1674; mas sí algunos en 1736. Palme (com. pers.) llamó la atención del autor sobre otro evento que podría haber ocurrido en la extremidad suroeste del segmento Boc-d, dentro de esa ventana de tiempo histórico. Este evento, ocurrido en 1801 DC, parece haber ocasionado daños en las poblaciones de Boconó, Trujillo y Las Mesitas (Grases *et al.* 1999). No se puede descartar que el mismo esté asociado con la falla de Boconó, pero la distribución de los daños apuntaría más bien a una falla fuente submeridiana y ubicada al norte de la falla de Boconó, como la falla de Burbusay (o El Empedrado; Fig. 2). Podría darse eventualmente el caso que estos dos sismos (1736 y 1801 DC) hayan ambos ocurrido sobre Boc-d, lo cual demostraría que no es un segmento sísmogénico único, requiriéndose su ulterior subdivisión.

En consecuencia, mayores estudios se requieren para resolver esta vacía de información de sísmología histórica, donde aún se desconoce el área afectada al igual

que el epicentro macrosísmico de la mayoría de esos sismos del noreste de los Andes de Mérida. Es igualmente concebible que el evento que se encuentra registrado en estas excavaciones de la región de Guarico corresponda a un sismo no conocido de la sísmología histórica venezolana, por haber ocurrido justo previo al descubrimiento de América del Sur y su posterior colonización a comienzos del siglo XVI. En tal caso, considerando que el intervalo de recurrencia de estos eventos es del orden de unos 400-500 años en el segmento Guarico (Audemard 2008), nos pudiésemos encontrar próximos a un evento destructor sobre la falla de Boconó entre Boconó y Barquisimeto, en vista que el tiempo transcurrido desde el último evento superaría ya el retorno entre dichos sismos.

Sección Boc-e (segmento San Felipe)

En la sección más septentrional de la falla de Boconó, externa a los Andes de Mérida y contigua al valle del Yaracuy, que se extiende en dirección noreste entre Barquisimeto y Morón (Boc-e), aquí denominada segmento San Felipe, dos evaluaciones paleosísmicas por intermedio de trincheras fueron realizadas en las localidades de El Salto (suburbio noreste de Yaritagua) y Quigua (T8 y T9 respectivamente, en Fig. 3).

La trinchera de Yaritagua (T8 en Fig. 3) fue cortada a través de un drenaje con forma de bayoneta que registra desplazamiento de su curso en forma dextral, evidenciando la cinemática de la falla de Boconó en esta localidad. Esta excavación expone el desarrollo del canal de un río, el cual se interdigita con coluviones fuerte-

mente orgánicos de los taludes del mismo canal (Fig. 8). Ollarves *et al.* (2005) interpretaron de manera preliminar, previo a la datación radiocarbónica de las muestras colectadas, la ocurrencia de al menos 9 sismos, con base en el mismo número de líneas de cantos interdigitados en el coluvión orgánico adosado al escarpe de falla, coincidiendo cada una de estas líneas de cantos con la base de cada fase de relleno sucesivo del canal instalado en la trinchera de falla (Fig. 8). Las dataciones radiocarbónicas apuntaron a que este canal, construido a expensas de episodios granodecrecientes, es esencialmente moderno (post-1950 DC). El análisis paleosísmico de esta excavación sólo permitió establecer la ocurrencia del evento más reciente. La construcción de este canal está perfectamente acotada por dos dataciones ^{14}C realizadas sobre fragmentos de carbón recolectados dentro de la secuencia fluvial previa, la cual es incisada por este canal más reciente, resultando que la edad de este canal es necesariamente más joven que 1800 años DC (Audemard 2008). Por otra parte, una grieta rellena de materia orgánica fue identificada en el talud contiguo a este canal. La edad del relleno de la grieta formada en ocasión de este último sismo resultó ser más reciente que 1800 DC, confirmando que el evento registrado en esta localidad es el de 1812 (Audemard 2008).

La excavación más septentrional realizada durante este estudio se ubicó en proximidad a Quigua, pequeña población ubicada al NNO de Guama, estado Yaracuy (T9 en Fig. 3). Esta trinchera, excavada ortogonal a un escarpe suavizado de exposición SSE del Segmento San Felipe de la falla de Boconó, preservado en el tope de un abanico aluvial pleistoceno, expuso una serie de cuñas coluviales que registran la actividad holocena de la falla de Boconó en esta localidad.

La datación de las cuñas coluviales arrojó las siguientes edades para los sismos identificados: 17600 AC, 10500 AC, 7550 AC, 4700 AC, 2700 AC y 1200 AC. Por otra parte, por un problema de inversión de edad, lo cual es relativamente frecuente cuando se generan cuñas coluviales por

degradación de escarpes de falla, debería reportarse un sismo entre los eventos de 10500 y 7550 AC. En comparación con los otros estudios paleosísmicos aquí discutidos, podemos precisar varios aspectos: 1) los sismos sobre esta traza de la falla de Boconó reportados son mucho más antiguos; 2) el intervalo de recurrencia es mucho más largo, oscilando entre 1500 y 2800 años, para los primeros seis sismos de esta cronología, asumiendo que se hayan reconocidos todos los eventos preservados en el registro geológico; 3) entre los dos eventos más viejos reportados hay una ventana sin actividad sísmica de algo más de 7000 años, lo cual hace presagiar que no necesariamente hemos identificado en trinchera todos los sismos aquí ocurridos; 4) el último evento claramente identificado ocurrió hace aproximadamente unos 3200 años, lo cual es ampliamente superior al retorno (inferior a 2800 años) que se puede calcular para los 6 últimos sismos determinados; y 5) una datación ^{14}C realizada sobre una muestra tomada de la zona de falla principal arrojó contaminación moderna, lo cual pudiese significar infiltración reciente hacia abajo de materia orgánica a lo largo del plano de falla, que podría interpretarse como una reactivación de la falla hace poco (¿sismo de 1812?). Por otra parte, el coluvión más reciente, ubicado a la vertical de la fractura principal, no aparenta convincentemente sellar la zona de falla subyacente, pudiendo implicar que sí ocurrió una reactivación post-1000 años AC; y probablemente en tiempos históricos.

Sin embargo, la cronología aquí obtenida difiere sustancialmente de aquellas de los segmentos Boc-b a Boc-d, en cuanto a la recurrencia de los sismos. Esto implicaría que la falla de Boconó en este sector es mucho más lenta (1,7 a 3,3 mm/a) que en los otros; velocidad en el mismo orden de lo estimado por Casas (1991). O por el contrario, esta evaluación paleosísmica se realizó en una traza de la falla de Boconó de varias en este sector, por lo que no representa la totalidad de los eventos que sobre ella han ocurrido. En la localidad de Quigua, la morfología sugiere que pudiesen haber dos otras trazas subpa-

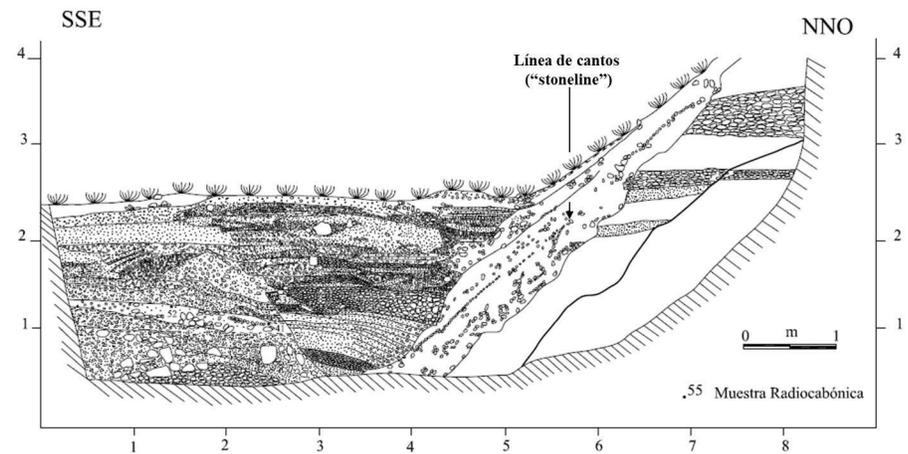


Figura 8: Levantamiento geológico de la pared oeste de la trinchera Yaritagua (T8; dibujo por Franck Audemard). Las líneas de canto por debajo del escarpe resultaron de origen hidrometeorológico.

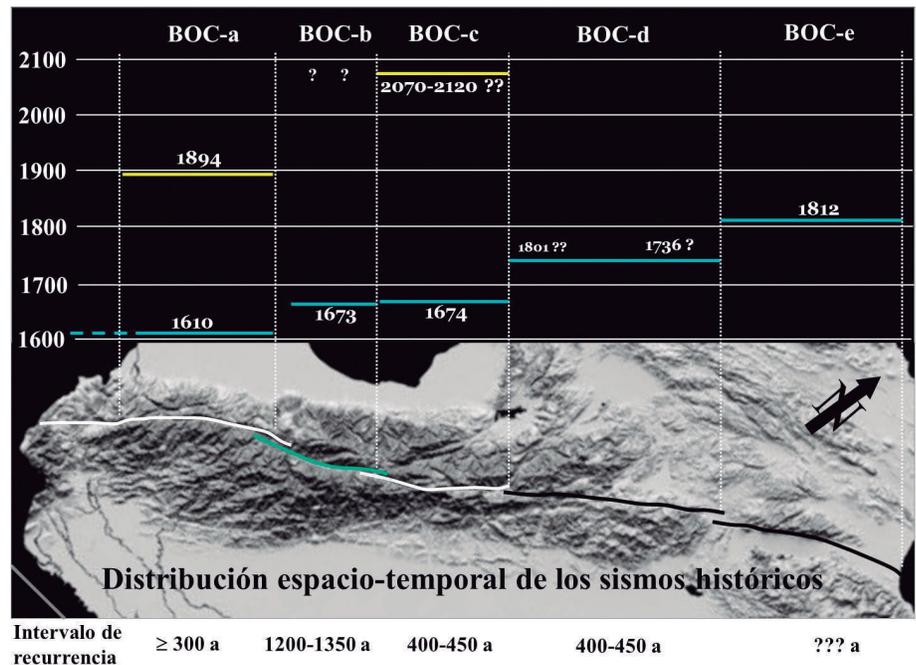


Figura 9: Distribución espacio-temporal de los sismos históricos mayores a lo largo de la Falla de Boconó, por segmentos sismogénicos (tomado de Audemard 2009c, 2010).

ralelas a la evaluada: una al pie del relieve escarpado y otra en posición más externa y hacia la depresión de Yaracuy. Más estudios en este sector son requeridos para obtener una mejor resolución de la actividad sísmica de la falla en el segmento San Felipe (Boc-e).

DISCUSIÓN

Once evaluaciones paleosísmicas por intermedio de trincheras realizadas hasta el presente sobre la falla de Boconó han

atestiguado la actividad holocena de la falla. Salvo una (Buena Vista: T4), todas las demás evidencian la ocurrencia de al menos un sismo histórico, lo cual permite concluir que todos los 5 segmentos propuestos por Audemard *et al.* (2000) han producido algún sismo de magnitud próxima o superior a Ms 7,0 (considerando la ocurrencia de ruptura superficial en falla transcurrente que posibilite la ejecución de evaluaciones por trincheras; Audemard 2003a, 2005, Audemard y Michetti 2011) en los últimos 500 años o

históricamente (Fig. 9). Implícitamente, lo antes indicado apuesta a que la falla de Boconó está definitivamente segmentada, en al menos 5 porciones principales, tal como fue sugerido por Audemard *et al.* (2000) sobre la base de la existencia de importantes complicaciones geométricas (relevos transtensivos; o transpresivos en menor cuantía).

La figura 9 presenta de forma resumida la distribución espacio-temporal de los sismos históricos adscritos a la falla de Boconó para cada uno de sus 5 segmentos. De su lectura, se puede determinar que, en el caso que la asignación del sismo de 1736 (y hasta de 1801?) con el segmento Guarico (Boc-d) de la falla de Boconó fuese correcta, el último ciclo de rupturas superficiales históricas sugiere una migración espacio-temporal de la actividad de la falla de Boconó del suroeste hacia el noreste, comenzando con el sismo de Mocotíes de 1610 en el segmento La Grita (Boc-a) en el sur y terminando en el segmento San Felipe (Boc-e) en el norte con el sismo del 26 de marzo de 1812, siendo el ciclo completado por los sismos de 1673-1674 (segmentos Mucuchíes -Boc-b- y Santo Domingo -Boc-c) y 1736 (y 1801?) en el segmento Guarico (Boc-d). Este comportamiento de la actividad sísmica a lo largo de un accidente mayor transcurrente recuerda al de la falla Nor-Anatoliana en Turquía durante los sismos mayores del siglo XX. De igual manera, la secuencia de sismos de 1673-1674 en los segmentos contiguos Mucuchíes y Santo Domingo de la falla de Boconó, aún mal desenmarañada por falta de extemporización de los sismos principales, asemeja al sismo de Izmit de agosto de 1999, ocurrido sobre la falla dextral Nor-Anatoliana, que dispara poco después el sismo de Duzce de octubre de 1999 en el segmento contiguo al este.

En el caso que el Gran Terremoto de los Andes Venezolanos del año 1894 sea la repetición del sismo de 1610, lo cual parece confirmar las estimaciones de magnitudes realizadas por Palme *et al.* (2005), y que la falla de Boconó mantenga el mismo comportamiento mostrado durante el ciclo 1610-1812, el próximo terremoto de

magnitud igual o superior a Ms 7,0 debería esperarse en los segmentos Mucuchíes (Boc-b) de la falla de Boconó (Fig. 9), cuya población cercana más resaltante es la ciudad de Mérida, o en el segmento contiguo de Santo Domingo (Boc-c). No obstante, a partir de los resultados arrojados por las trincheras de Morro de Los Hoyos (T3; Audemard *et al.* 1999a) y Mesa del Caballo (T5; Audemard *et al.* 2008), parece más factible que se active próximamente el segmento Boc-c dado que este ocurre cada 400-450 años y ambos segmentos sólo se activan conjuntamente cada 1300-1450 años (Audemard *et al.* 2008), debiendo repetirse una ruptura conjunta no antes de 3300 DC. En tal caso, la progresión de las rupturas hacia el noreste en el ciclo 1610-1812 es totalmente fortuita porque se rompería primero Boc-c que Boc-b. Sin embargo, sí podemos aseverar que el próximo gran terremoto en la región andina en asociación con la falla de Boconó tendrá lugar en la porción central andina (Boc-c; ¿con o sin Boc-b?), tal como lo demuestra los vectores de desplazamiento paralelos a la falla de Boconó derivados por Pérez *et al.* (2011). Estos vectores claramente muestran que la falla de Boconó en el sector más central de Los Andes de Mérida está relativamente bloqueada y cargándose elásticamente, si se comparan estos vectores de desplazamiento de rumbo con aquellos obtenidos más al suroeste como al noreste.

Aquellos segmentos, cuyos sismos históricos son relativamente bien conocidos a partir del análisis macrosísmico de los documentos históricos, es decir de la distribución de los daños reportados, la asociación sismotectónica (relación causal de los terremotos) es relativamente fácil de establecer y es ciertamente confiable. En tal sentido, los sismos históricos de la región andina septentrional (entre Boconó y Barquisimeto), asociados al segmento Guarico (Boc-d) de la falla de Boconó, requieren ser estudiados con mayor detalle. Particular atención debe prestársele a los sismos de 1736 y 1801 DC, sin menoscabo de otros sismos de igual importancia que podrían estar asociados a fallas satélites de la falla de Boconó (e.g. 1775,

1950 DC). Las poblaciones de los Andes de Mérida septentrionales deberían ser barridas sistemáticamente en búsqueda de información referente a daños ocasionados por los sismos o la perturbación de la vida cotidiana a causa de sus efectos; tal como lo ha hecho la Prof. Palme para la ciudad de Trujillo.

La discrepancia aún existente entre la asociación sismotectónica del sismo de 1894 establecida por vía geológica por Audemard (1997, 1998) y los centros de intensidades de este sismo en el flanco norandino (Rengifo y Laffaille 1998, 2000, Palme *et al.* 2005) llama a la prudencia en el empleo de la distribución de los daños como única aproximación para el establecimiento de asociaciones sismotectónicas certeras, tal como anticipado por Rodríguez y Audemard (2003).

Finalmente, de los resultados aquí obtenidos, sugerimos que deben densificarse las evaluaciones paleosísmicas por trincheras (u otros enfoques) en los segmentos La Grita y Mucuchíes (Boc-a y Boc-b), excavándose una trinchera próxima a Mérida (porción central de la sección Boc-b), para confirmar la recurrencia determinada y la historia sísmica propuesta, mientras que en la sección más meridional (Boc-a o segmento La Grita) debemos asegurarnos a futuro de evaluar todas las trazas activas o potencialmente activas de la falla de Boconó en el valle del Torbes, faltando actualmente dos trazas por ser investigadas. Idealmente, para comprender cómo se distribuye en la región meridional la tasa de movimiento conocida (10 mm/a) de la falla de Boconó en los Andes centrales, deberían evaluarse también todos los otros sistemas subparalelos activos (Queniquea, Uribante-Caparo, Aguas Calientes entre otras). Esta región por sí sola amerita un proyecto específico, lo cual está actualmente en progreso.

CONCLUSIONES

Las excavaciones con fines paleosísmicos demuestran en este estudio que son excelentes instrumentos para definir la relación causa-efecto entre la falla de Boconó y los principales sismos históricos

ocurridos en los Andes de Mérida y la sierra de Aroa. Esto es extrapolable a cualquier falla y sus sismos asociados, y más particularmente para aquellos sismos históricos ocurridos en regiones continentales, y preferiblemente habitadas de manera dispersa aunque no necesariamente homogénea. Igualmente queda al descubierto que los estudios paleosísmicos pueden sólo restringir la falla generadora de aquellos sismos históricos que estén suficientemente bien estudiados o que tengan suficiente información macrosísmica; indistintamente de la intrínseca limitación de la paleosismología por vía de trincheras en cuanto a los sismos explorables, dado que deben ser al menos próximos a magnitud 7,0 en fallas transcurrentes.

Los epicentros de sismos históricos derivados a partir de estudios macrosísmicos deben ser considerados como tales, y no necesariamente deben guardar relación geográfica con su falla causativa. En otras palabras, la distribución geográfica de los efectos de sitio en ocasión de un sismo puede desligar el epicentro macrosísmico de la falla generadora del evento, aun siendo el plano de la falla activa de buzamiento subvertical.

Podemos concluir señalando que la paleosismología y la sismología histórica son enfoques complementarios y parcialmente solapables, más no excluyentes, en el estudio de la sismicidad de una región. Por último, en el caso particular de la falla de Boconó aquí presentado, la falla aparenta romper sus segmentos de manera progresiva de suroeste a noreste; al menos para el ciclo ocurrido entre 1610 y 1812 DC. Los segmentos aparentan ser sismogénicamente unidades discretas, es decir con historias sísmicas individuales por segmento, aunque en ocasiones la ruptura puede permear de un segmento al vecino tal como ocurrió en 1674 entre los segmentos Boc-b (Mucuchíes) y Boc-c (Santo Domingo). Estudios de transferencia de esfuerzos podrían aportar luces sobre la eficiencia de las barreras geométricas identificadas entre segmentos sismogénicos.

AGRADECIMIENTOS

Se desea expresar el más sincero agradecimiento a todos aquellos colegas, los cuales no podría enumerar aquí por razones de espacio, que contribuyeron a lo largo de los años tanto a la cartografía de la traza activa de la falla de Boconó, como en los estudios paleosísmicos por trincheras realizados sobre ella. Este artículo muy particularmente se dedica a la memoria del Geólogo Jean-Pierre Soulas, quien falleció prematuramente en el año 2009 en su Francia natal, por sus trabajos paleosísmicos pioneros en los Andes de Mérida, sobre los sistemas de Uribante-Caparo y Boconó; en aquellas trincheras que exploraron la falla de Boconó, tuve la ocasión de compartirlos con él y aprender también de él. Quiero igualmente agradecer a la *International Association of Geomorphologists (IAG)*, que en mi calidad de Vicepresidente de ésta, cubrió parcialmente mis gastos para participar al *VII International Conference on Geomorphology* (Melbourne, Australia), como a los organizadores de las V Jornadas Venezolanas de Sismología Histórica (Mérida, Venezuela), y del *Hokudan International Symposium on Active Faulting 2010, Japan: Forecasting Large Earthquakes from Active Faults in Time and Space* (Hokudan Town, Awaji Island, Japón), quienes gentilmente me invitaron a presentar estos resultados. El financiamiento para las evaluaciones paleosísmicas (7 excavaciones en total y subsecuentes dataciones radiocarbónicas) realizadas entre 2004 y 2006 fue provisto por el proyecto FONACIT 2001002492, por lo que este trabajo es una contribución al mismo. Deseo expresar igualmente mi agradecimiento a los Drs. José J. Martínez Díaz y Héctor Perea Manera, por sus observaciones y recomendaciones.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Aggarwal, Y. 1983. Seismic gaps and earthquake hazard in Venezuela. Proceedings of Simposio Neotectónica, Sismicidad y Riesgo Geológico en Venezuela y el Caribe, Abstracts: 26, Caracas.
- Altez, R. 1998. Cronometrización extemporá-

nea: los sismos del 26 de marzo de 1812 en Caracas y Mérida. *Revista Geográfica Venezolana* 39: 297-325.

Altez, R. 2005. Todo lo que se movió en 1812 en la placa del Caribe: sismos, volcanes y transmisión de energía. *Revista Geográfica Venezolana*, Número especial: 143-170.

Alvarado, M. 2008. Caracterización Neotectónica de la cuenca La González. Estado Mérida, Venezuela. Trabajo Final de Grado, Universidad Central de Venezuela (inédito), 89 p., Caracas.

Alvarado, M., Audemard, F.A., Laffaille, J., Ollarves, R. y Rodríguez, L.M. 2007. Análisis paleosismológico de la falla de Boconó en el sector Lagunillas, Estado Mérida, Venezuela. 9º Congreso Geológico Venezolano, CD Resúmenes: 7 p., Caracas.

Alvarado, M., Audemard, F.A., Laffaille, J., Ollarves, R. y Rodríguez, L.M. 2008. Paleoseismic investigation on the Boconó fault, between Las González and Estanques, Mérida Andes, Venezuela. 7º International Symposium on Andean Geodynamics, Resúmenes: 37-40, Nice.

Alvarado, M., Audemard, F.A., Laffaille, J., Ollarves, R. y Rodríguez, L.M. 2009. Paleoseismic analysis of the Boconó fault, between the La Gonzalez-Estanques towns, Mérida state, Venezuela. 7º International Conference on Geomorphology, CD Resúmenes: 1p., Melbourne.

Audemard, F.A. 1997. Holocene and historical earthquakes on the Boconó fault system, southern Venezuelan Andes: trench confirmation. *Journal of Geodynamics* 24: 155-167.

Audemard, F.A. 1998. Contribución de la paleosismología a la sismicidad histórica: los terremotos de 1610 y de 1894 en los Andes venezolanos meridionales. En Ferrer, C., Laffaille, J. y Rengifo, M. (eds.) Selección de artículos de las Primeras Jornadas de Sismicidad Histórica en Venezuela, Núcleo Universitario Rafael Rangel, ULA-Trujillo, mayo 1997. *Revista Geográfica Venezolana* 39: 87-105.

Audemard, F.A. 2002. Ruptura de los grandes sismos históricos venezolanos de los siglos XIX y XX revelados por la sismicidad instrumental contemporánea. 11º Congreso Venezolano de Geofísica, CD Resúmenes: 8p., Caracas.

Audemard, F.A. 2003a. Estudios paleosísmicos por trincheras en Venezuela: métodos, alcan-

- ces, aplicaciones, limitaciones y perspectivas. *Revista Geográfica Venezolana* 44: 11-46.
- Audemard, F.A. 2003b. Geomorphic and geologic evidence of ongoing uplift and deformation in the Mérida Andes, Venezuela. *Quaternary International* 101-102C: 43-65.
- Audemard, F.A. 2005. Paleoseismology in Venezuela: objectives, methods, applications, limitations and perspectives. *Tectonophysics* 408: 29-61.
- Audemard, F.A. 2008. Historia sísmica y segmentación sismogénica de la falla de Boconó con base en el análisis geológico de sedimentos recientes deformados (por vía de trincheras y núcleos continuos). Proyecto Fonacit 2001002492. Informe interno FUN-025, 83 p., Caracas.
- Audemard, F.A. 2009a. Falla de Boconó, Venezuela (VE-06b y VE-06c). En Proyecto Multinacional Andino. Geociencia para las comunidades andinas (eds.) Atlas de deformaciones cuaternarias de Los Andes. Publicación Geológica Multinacional 7: 260-272.
- Audemard, F.A. 2009b. Key issues on the post-Mesozoic southern Caribbean plate boundary. En James, K.H., Lorente, M.A. y Pindell, J. (eds) Origin and Evolution of the Caribbean Plate, Geological Society of London, Special Publications 328: 567-584.
- Audemard, F.A. 2009c. Segmentation of the Boconó Fault from paleoseismic trench results, Mérida Andes, Venezuela. 7° International Conference on Geomorphology, Abstracts CD: 1 p., Melbourne.
- Audemard, F.A. 2010. Seismogenic Fault Segmentation of the Boconó Fault from Paleoseismic Trench Results, Western Venezuela: NE-Directed Rupture during the Latest Earthquake Cycles? Hokudan International Symposium on Active Faulting, Abstracts: 6-8, Hokudan.
- Audemard, F.E. y Audemard, F.A. 2002. Structure of the Mérida Andes, Venezuela: relations with the South America-Caribbean geodynamic interaction. *Tectonophysics* 345: 299-327.
- Audemard, F.A. y Michetti, A.M. 2011. Geological criteria for evaluating seismicity revisited: 40 years of paleoseismic investigations and the natural record of past earthquakes, GSA Special papers 479: 1-21, Boulder.
- Audemard, F.A. y Singer, A. 1996. Active Fault Recognition in Northwestern Venezuela and its Seismogenic Characterization: Neotectonic and Paleoseismic approach. En Enghdal, E.R., Castano, J. y Berrocal, J. (eds.) Proceedings of the 1994 Regional Seismological Assembly in South America. *Geofísica Internacional* 35: 245-255.
- Audemard, F.A. y Soulas, J-P. 1995. Trench Confirmation of Historical Earthquakes on the Boconó Fault System, Southern Venezuelan Andes. 14° INQUA International Congress -Symposium on Paleoseismology, Terra Nostra 2/95: 16, Berlín.
- Audemard, F.A., Pantosti, D., Machette, M., Costa, C., Okumura, K., Cowan, H., Diederix, H., Ferrer, C. y participantes Sawop 1999a. Trench investigation along the Merida section of the Boconó fault (central Venezuelan Andes), Venezuela. *Tectonophysics* 308: 1-21.
- Audemard, F.A., Romero, G. y Rendón, H. 1999b. Sismicidad, Neotectónica y Campo de Esfuerzos del Norte de Venezuela. FUNVISIS' unpublished Report for PDVSA-CVP, 221 p., Caracas.
- Audemard, F.A., Machette, M., Cox, J., Dart, R. y Haller, K. 2000. Map and Database of Quaternary Faults in Venezuela and its Offshore Regions. US Geological Survey Open-File Report 00-0018: 1-78.
- Audemard, F.A., Ollarves, R., Betchtold, M., Díaz, G., Beck, C., Carrillo, E., Pantosti, D. y Diederix, H. 2008. Trench investigation on the main strand of the Boconó fault in its central section, at Mesa del Caballo, Mérida Andes, Venezuela. *Tectonophysics* 459: 38-53.
- Bakun, W.H. y Wentworth, C.M. 1997. Estimating earthquake locations and magnitudes from seismic intensity data, *Bulletin of the Seismological Society of America* 87: 1502-1521.
- Beltrán, C., 1994. Trazas activas y síntesis neotectónica de Venezuela a escala 1:2.000.000. Proceedings 7° Congreso Venezolano de Geofísica, Resúmenes: 541-547, Caracas.
- Beltrán, C., Giraldo, C. y Singer, A. 1990. Evaluation of recent tectonic activity of the Boconó fault near Barquisimeto (Venezuela) based on trench observation. *Bulletin of the INQUA Neotectonics Commission* 13: 51.
- Boinet, T. 1985. La frontière méridionale de la plaque caraïbe aux confins colombo-vénézuéliens (Norte de Santander, Colombia): données géologiques. Tesis doctoral, Université de Paris (inédito), 204 p., Paris.
- Bueno, M. 2009. Registro paleosísmico en el segmento Cabudare-Morón de la falla de Boconó cerca de la ciudad de San Felipe, Venezuela. V Congreso Venezolano de Sismología e Ingeniería Sísmica, CD Resúmenes: 13 p., Caracas.
- Bueno, M.L., Ollarves, R. y Audemard, F.A. 2005. Interpretaciones preliminares en la caracterización sismogénica de la falla de Boconó en el segmento Sabana Grande-Sanare (estado Lara), con base en dos excavaciones paleosísmicas. 4° Coloquio sobre Microzonificación Sísmica. Serie Técnica Funvisis 1-2005: 67-72.
- Carrillo, E. 2006. L'enregistrement sédimentaire de la sismicité récente le long de la frontière sud-occidentale de la plaque Caraïbe (faille de Boconó): Modalité et chronologie, contribution à l'estimation de l'aléa sismique régional. Tesis doctoral, Université de Savoie (inédito), 313 p. Chambéry.
- Carrillo, E., Audemard, F.A., Beck, C., Cousin, M., Jouanne, F., Cano, V., Castilla, R., Melo, L. y Villemain, T. 2006. A Late Pleistocene natural seismograph along the Boconó fault (Mérida Andes, Venezuela): the moraine-dammed Los Zepa paleo-lake. *Bulletin de la Société Géologique de France* 177: 3-17.
- Carrillo, E., Beck, C., Audemard, F.A., Moreno, E. y Ollarves, R. 2008. Disentangling Late Quaternary climatic and seismo-tectonic controls on Lake Mucubají sedimentation (Mérida Andes, Venezuela). *Palaeogeography, Palaeoecology and Palaeoclimatology*, 259: 284-300.
- Casas, A.M. 1991. Estudio sismotectónico del valle de Yaracuy. Informe inédito FUNVISIS, 123 p., Caracas.
- Centeno Graü, M. 1940. Estudios Sismológicos. Litografía del Comercio: 365 p., Caracas.
- Choy, J. 1998. Profundidad y mecanismo focal del terremoto de El Tocuyo, 1950. *Revista Geográfica Venezolana* 39: 203-217.
- Choy, J., Palme, C., Guada, C., Morandi, M. y Klarica, S. 2010. Macroseismic Interpretation of the 1812 Earthquakes in Venezuela Using Intensity Uncertainties and A Priori Fault-Strike Information. *Bulletin of the Seismological Society of America* 100: 241-255.
- Cluff, L. y Hansen, W. 1969. Seismicity and Seis-

- mic Geology of Northwestern Venezuela. Woodward-Clyde y Associates' unpublished report for Shell de Venezuela 1 y 2, 77 p., Maracaibo.
- Ferrer, C. 1991. Características geomorfológicas y neotectónicas de un segmento de la falla de Boconó entre la ciudad de Mérida y la Laguna de Mucubají, Estado Mérida. Guía de la excursión. Escuela Latinoamericana de Geofísica, 25 p., Mérida.
- Fiedler, G. 1961. Áreas afectadas por terremotos en Venezuela. III Congreso Geológico Venezolano, Memoria 3: 1791-1810, Caracas.
- Frey Mueller, J.T., Kellogg, J.N. y Vega, V. 1993. Plate motions in the north Andean region. *Journal of Geophysical Research* 98: 21853-21863.
- Garrity, C., Hackley, P. y Urbani, F. 2004. Digital shaded-relief map of Venezuela. <http://pubs.usgs.gov/of/2004/1322>.
- Grases, J. 1990. Terremotos destructores del Caribe 1502-1990. Orcey (UNESCO), Montevideo, Uruguay. 132 p., Montevideo.
- Grases, J., Altez, R. y Lugo M. 1999. Catálogo de Sismos Sentidos o Destructores Venezuela 1530/1998, Universidad Central de Venezuela/Academia de Ciencias Física, Matemáticas y Naturales, Facultad de Ingeniería, 650 p., Caracas.
- Laffaille, J., Audemard, F.A. y Alvarado M. 2008. San Antonio de Mucunón: Mudanza de un pueblo de doctrina luego del terremoto de 1674. 14° Congreso Venezolano de Geofísica, Resúmenes extendidos: 8 p., Caracas.
- Laffaille, J., Audemard, F.A. y Alvarado, M. 2010. San Antonio de Mucunón, Mérida Andes, Venezuela: Relocation of a doctrine village following the 1674 earthquake. En Sintubin, M., Stewart, I.S., Niemi, T.M. y Altunel, E. (eds.) Ancient Earthquakes. GSA Special Papers series 471: 39-46.
- McCann, W. y Pennington, W. 1990. Seismicity, large earthquakes, and the margin of the Caribbean plate. En Dengo, D. y Case, J.E. (eds.) The Caribbean region. The Geology of North America H., Geological Society of America: 291-306, Boulder.
- Minster, J. y Jordan, T. 1978. Present-day plate motions. *Journal of Geophysical Research* 83: 5.331-5.354.
- Molnar, P. y Sykes, L. 1969. Tectonics of the Caribbean and Middle America Regions from focal mechanisms and Seismicity. *Geological Society of America Bulletin* 80: 1639-1684.
- Ollarves, R., Bueno, M. L. y Audemard, F.A. 2005. Evaluación paleosísmica de los segmentos de falla Yaritagua y Quigua, edo. Yaracuy, en el extremo nororiental de la falla de Boconó. IV Coloquio sobre Microzonificación Sísmica, Serie Técnica Funvisis 1-2005: 183-186, Barquisimeto.
- Palme, C. y Altez, R. 2002. Los terremotos de 1673 y 1674 en los Andes venezolanos. *Interciencia* 27: 220-226.
- Palme, C., Morandi, M. y Choy, J. 2005. Re-evaluación de las intensidades de los grandes sismos históricos de la región de la cordillera de Mérida utilizando el método de Bakun y Wentworth. *Revista Geográfica Venezolana*, número especial: 233-253.
- Pérez, O. J., Bilham, R., Sequera, M., Molina, L., Gavotti, P., Codallo, H., Moncayo, C., Rodríguez, C., Velandia, R., Guzmán M. y Molnar, P. 2011. Campo de Velocidades GPS en el Occidente de Venezuela: Componente lateral derecha asociada a la Falla de Boconó y componente convergente perpendicular a Los Andes. *Interciencia* 36: 39-44.
- Rengifo, M. y Laffaille, J. 1998. El terremoto del año 1894 en los Andes venezolanos. *Revista Geográfica Venezolana* 39: 141-162.
- Rengifo, M. y Laffaille, J. 2000. Reevaluación del sismo del 28 de abril de 1894. *Acta Científica Venezolana* 51: 160-175.
- Rod, E. 1956a. Earthquakes of Venezuela related to strike slip faults? *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 40: 2509-2512.
- Rod, E. 1956b. Strike-slip faults of northern Venezuela. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 40: 457-476.
- Rodríguez, J. A. y Audemard, F.A. 1997. Estudio Neotectónico y Geología de Fallas Activas en el Piedemonte Surandino de los Andes Venezolanos (Proyecto INTEVEP 95-061). Informe Inédito para INTEVEP, S.A., 155 p., Caracas.
- Rodríguez, J.A. y Audemard, F.A. 2003. Sobrestimaciones y limitaciones en los estudios de sismicidad histórica con base en casos venezolanos. *Revista Geográfica Venezolana* 44: 47-75.
- Schubert, C. 1974. Late Pleistocene Mérida Glaciation, Venezuelan Andes. *Boreas* 3: 147-152.
- Schubert, C. 1980. Morfología neotectónica de una falla rumbo-deslizante e informe preliminar sobre la falla de Boconó, Andes meridionales. *Acta Científica Venezolana* 31: 98-111.
- Schubert, C. 1982. Neotectonics of the Boconó fault, western Venezuela. *Tectonophysics* 85: 205-220.
- Singer, A. y Beltrán, C. 1996. Active faulting in the Southern Venezuelan Andes and Colombian borderland. 3rd International Symposium on Andean Geodynamics, Abstracts: 243-246, Saint-Malo.
- Soulas, J-P. 1985. Neotectónica del flanco occidental de los Andes de Venezuela entre 70°30' y 71°00'W (Fallas de Boconó, Valera, Piñango y del Piedemonte). 6° Congreso Geológico Venezolano, Memorias 4: 2690-2711, Caracas.
- Soulas, J-P. 1986. Neotectónica y tectónica activa en Venezuela y regiones vecinas. 6° Congreso Geológico Venezolano, Memorias 10: 6639-6656, Caracas.
- Soulas, J-P., Rojas, C. y Schubert, C. 1986. Neotectónica de las fallas de Boconó, Valera, Tuname y Mene Grande. Excursión N° 4. 6° Congreso Geológico Venezolano, Memorias 10: 6961-6999, Caracas.
- Soulas, J.-P., Singer, A. y Lugo, M. 1987. Tectónica cuaternaria, características sismogénicas de las fallas de Boconó, San Simón y del piedemonte occidental andino y efectos geológicos asociados a la sismicidad histórica (Proyecto Sumandes). FUNVISIS para MARAVEN (inédito), 90 p., Caracas.
- Suárez, G. y Nábelek, J. 1990. The 1967 Caracas Earthquake: Fault Geometry, Direction of Rupture Propagation and Seismotectonic Implications. *Journal of Geophysical Research*, 95(B11): 17459-17474.
- Tricart, J. y Michel, M. 1965. Monographie et carte geomorphologique de la region de la Lagunillas (Andes vénézuéliennes). *Revue de Géomorphologie Dynamique* 15: 1-33.
- Trenkamp, R., Kellogg, J., Freymueller, J. y Mora, H. 2002. Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations. *Journal of South American Earth Sciences* 15: 157-171.

Recibido: 11 de julio, 2013

Aceptado: 22 de noviembre, 2013