

## Renovada sismicidad superficial en el oriente venezolano después del sismo de Cariaco de julio de 1997

Franck A. Audemard M.<sup>1\*</sup>; Leonardo Alvarado<sup>2</sup>; Aura Fernández<sup>3</sup>; Gloria Romero<sup>2</sup>; Alejandra Leal<sup>2</sup>; Raquel Vásquez<sup>2</sup>; José Antonio Rodríguez<sup>1</sup>; Alejandra Martínez<sup>1</sup>; Ivette Barrios<sup>2</sup>

DOI: <http://dx.doi.org/10.18273/revbol.v41n1-2019006>

**Forma de citar:** Audemard M., F.A., Alvarado, L., Fernández, A., Romero, G., Leal, A., Vásquez, R., Rodríguez, J.A., Martínez, A., y Barrios, I. (2019). Renovada sismicidad superficial en el oriente venezolano después del sismo de Cariaco de julio de 1997. *Boletín de Geología*, 41(1), 117-132. DOI: 10.18273/revbol.v41n1-2019006

### RESUMEN

La presente investigación muestra que la región oriental venezolana se caracteriza por una mayor actividad sísmica en el presente siglo XXI, después de la ocurrencia del sismo de Cariaco del 09 de julio de 1997 de magnitud Mw 6,9, a partir del análisis cualitativo-cuantitativo de la sismicidad instrumental sobre una ventana temporal de más de 30 años (1983-2017). Este incremento de la actividad sísmica no es aleatorio y se presenta bajo “nubes” de sismos corticales que se alinean a lo largo de las fallas El Pilar (FEP), Los Bajos (FLB), El Soldado (FES) y Bohordal (FB), particularmente en sus porciones circunscritas al golfo de Paria. Igualmente, tal sismicidad se ubica al Sur del segmento más oriental de la FEP de buzamiento sur y al Este del sistema de fallas del Graben de San Juan. A este segmento de FEP se le desconoce sismo histórico, o instrumental, destructor, de profundidad cortical, sobre al menos 520 años. Dado que el segmento contiguo al Oeste de la FEP ocurre cada 350-450 años con sismos Mw +7,0, cabe proponer que la sismicidad actual inusitada, sobre FEP y todas las fallas cuaternarias mecánicamente vinculadas a ellas, resulte de transferencia de esfuerzos de la ruptura reciente del segmento al Occidente en 1997, preparando al segmento más oriental de FEP para su eventual ruptura con un sismo de capacidad destructora, Mw +7,0, con eventual asociación de tsunami (sismo tsunamigénico). El hecho de presentar un porcentaje de movimiento asísmico (*creep*) más elevado que aquel roto durante el sismo de Cariaco de 1997 (50% vs 40%), así como una tasa de movimiento algo más lenta también (10 vs 12 mm/a), justificaría que su periodo de retorno sea algo más largo que 350-450 años; éste último estimado de evaluaciones paleosísmicas para el segmento activado en 1997.

**Palabras clave:** Sismicidad cortical; Red Sismológica Nacional de Venezuela; Transferencia de esfuerzos; Desplazamiento asísmico; Repteo; Amenaza.

### Renewed shallow seismicity in eastern Venezuela after the Cariaco July 1997 earthquake

#### ABSTRACT

This research shows a clear increase in shallow seismicity in the 21st century, after the Cariaco July 09th, 1997 earthquake, from the qualitative-quantitative analysis of a more than 30-year-long record of instrumental seismicity (1983-2017). The seismic activity increase is not randomly distributed but comes in patches, which align along with the El Pilar (FEP), Los Bajos (FLB), El Soldado (FES) and Bohordal (FB) faults, very particularly with their portions close or within the Paria gulf. Equally, this seismicity occurs South of the easternmost south-dipping FEP segment, and East of the San Juan Graben fault system. No major or destructive historical and instrumental earthquake is associated to this segment for the last 520 years. From the assumption that the contiguous-to-the-west FEP segment recurs roughly every 350-450 years with an Mw +7.0 event, we invoke that stress transfer from the recently-broken 1997 segment is responsible for the unusually high crustal seismicity happening in this 21st century, activating the easternmost FEP segment as well as the mechanically interconnected southern faults. This could lead to a major destructive (eventually tsunamigenic) earthquake on FEP in the near future. On the other hand, the higher creep (50 over 40%) and slower slip rate (10 vs 12 mm/yr) of the easternmost segment than its western contiguous segment could account for the longer return period; longer than the 350-450 year return period determined from paleoseismic trench studies undertaken across the 1997 earthquake rupture.

**Keywords:** Shallow seismicity; Venezuelan Seismological Network; Stress transfer; Aseismic slip; Creep; Hazard.

<sup>1</sup> Departamento de Ciencias de la Tierra, Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), Caracas, Venezuela. (\*) [faudemard@funvisis.gob.ve](mailto:faudemard@funvisis.gob.ve); [jrodriguez@funvisis.gob.ve](mailto:jrodriguez@funvisis.gob.ve)

<sup>2</sup> Departamento de Sismología, Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), Caracas, Venezuela. [lalvarado@funvisis.gob.ve](mailto:lalvarado@funvisis.gob.ve); [gromero@funvisis.gob.ve](mailto:gromero@funvisis.gob.ve); [aleal@funvisis.gob.ve](mailto:aleal@funvisis.gob.ve); [rvasquez@funvisis.gob.ve](mailto:rvasquez@funvisis.gob.ve); [amartinez@funvisis.gob.ve](mailto:amartinez@funvisis.gob.ve); [ibarrios@funvisis.gob.ve](mailto:ibarrios@funvisis.gob.ve)

<sup>3</sup> Presidencia, Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), Caracas, Venezuela. [presidencia@funvisis.gob.ve](mailto:presidencia@funvisis.gob.ve)

## INTRODUCCIÓN

A nivel nacional, la región nororiental venezolana (FIGURA 1) se caracteriza por ser la de mayor actividad sísmica en tiempos recientes a nivel nacional, tal como lo evidencia el catálogo sísmico instrumental de FUNVISIS para el período 1910-2017. Esta sismicidad es particularmente mejor conocida, caracterizada y catalogada desde la implementación de la primera red de estaciones sismológicas de cobertura nacional (Red de Estaciones Sismológicas de Venezuela de Apertura Continental, RESVAC) en el año 1983 (FIGURA 2). De la observación de la FIGURA 2, se aprecia que la actividad sísmica se concentra en unos 5 grandes “centros o nubes”, para no usar adrede el término enjambre, más allá de una siempre presente sismicidad de fondo. La más grande de estas nubes de actividad sísmica, aquella ubicada al norte de la península de Paria, es de profundidad intermedia (60 a menos de 200 km de profundidad), como lo revela la comparación de las FIGURAS 2 y 3, donde en la FIGURA 3 sólo se ha graficado la actividad sísmica superficial, para la misma ventana temporal de 1983-2017; figura en la que desaparece sustancialmente el grueso de los epicentros de los sismos que la conformaban. Esta sismicidad, de profundidad intermedia, al norte de la península de Paria, ha sido regularmente vinculada a un desgarre litosférico de la losa oceánica atlántica adherida al continente sudamericano, en su proceso de subducción por debajo de la placa Caribe (Russo y Speed, 1992; Clark *et al.*, 2008), que conlleva consigo a su vez el desprendimiento del manto litosférico de la corteza continental sudamericana (VanDecar *et al.*, 2003; Bezada *et al.*, 2010). Esta sismicidad no es de nuestro interés en la presente contribución, sin embargo, podemos indicar que su orientación NE-SO, subparalela a las isobatas de la losa de subducción propuestas por VanDecar *et al.* (2003), correspondería particularmente con la terminación nororiental de dicho desgarre, tal como ha sido visualizado por Clark *et al.* (2008), indicando que este proceso está actualmente en curso y sísmicamente activo en tal terminación. Gran parte de esta sismicidad ronda alrededor del centenar de kilómetros de profundidad; y a diferencia de una familia de sismos más someros que responden a fallamiento normal por flexión de placas (fallas por momento flector; solución 16 de

Audemard y Castilla, 2016), esta sismicidad responde a compresión NO-SE (ver solución 15 de Audemard y Castilla, 2016) y muchos de los mecanismos focales que componen esta solución resultan tener movimiento oblicuo con componente de rumbo, lo cual aparenta ser coherente con modo de ruptura III (desgarre). Por el contrario, las 4 otras “nubes” de sismicidad visibles en las FIGURAS 2 y 3, son de profundidad cortical, estando limitadas a los 25 primeros kilómetros de profundidad. Claramente, tres de estos focos de actividad parecen guardar relación con fallas activas o sismogénicas cartografiadas (*e.g.*, Soulas, 1986; Beltrán, 1994; Audemard *et al.*, 2000), mientras la cuarta queda confinada al bloque al Este del Bloque de Caripe, limitado al Oeste y Este por las fallas del graben del río San Juan (SFGSJ) y Bohordal (FB), respectivamente. Esta investigación se va a centrar en la evolución espacio-temporal y frecuencial de estos focos de actividad sísmica reciente y su relación con el marco geológico-estructural activo del Oriente venezolano. Un incremento inusual de la actividad sísmica en el golfo de Paria y al Oeste de éste en los últimos años ha llamado la atención de los autores.

Es pertinente resaltar que esta condición de alta sismicidad en el Oriente venezolano en tiempos históricos, pre-era sismológica instrumental (1498-1900), ocurría igualmente (FIGURA 4), como lo respalda la profusión de relatos o relaciones históricas sobre los daños acaecidos en dicha región desde los albores de la conquista española (a título ilustrativo, referirse a Gómez, 1990). Pérdidas cuantiosas han generado los terremotos de Cumaná de 1530, 1797, 1853 y 1929, sin ser necesariamente sismos de grandes magnitudes (algunos a penas mayores a Ms 7,0; Centeno Graü, 1940; Grases, 1979; 1990; Grases *et al.*, 1999). Curiosamente, el sismo del 21 de octubre de 1766 es considerado el más grande en magnitud (Mw 7,8), pero no necesariamente el más destructivo aún para la región oriental, aunque si el de mayor área sentida (del orden de  $2 \times 10^6$  km<sup>2</sup>), lo cual ha llevado a diversos autores (Lugo y Giraldo, 1989; Audemard, 1999b, 2007; Mocquet, 2007) a considerarlo de profundidad intermedia y vinculado a la losa de subducción atlántica en cercanía a la península de Paria.

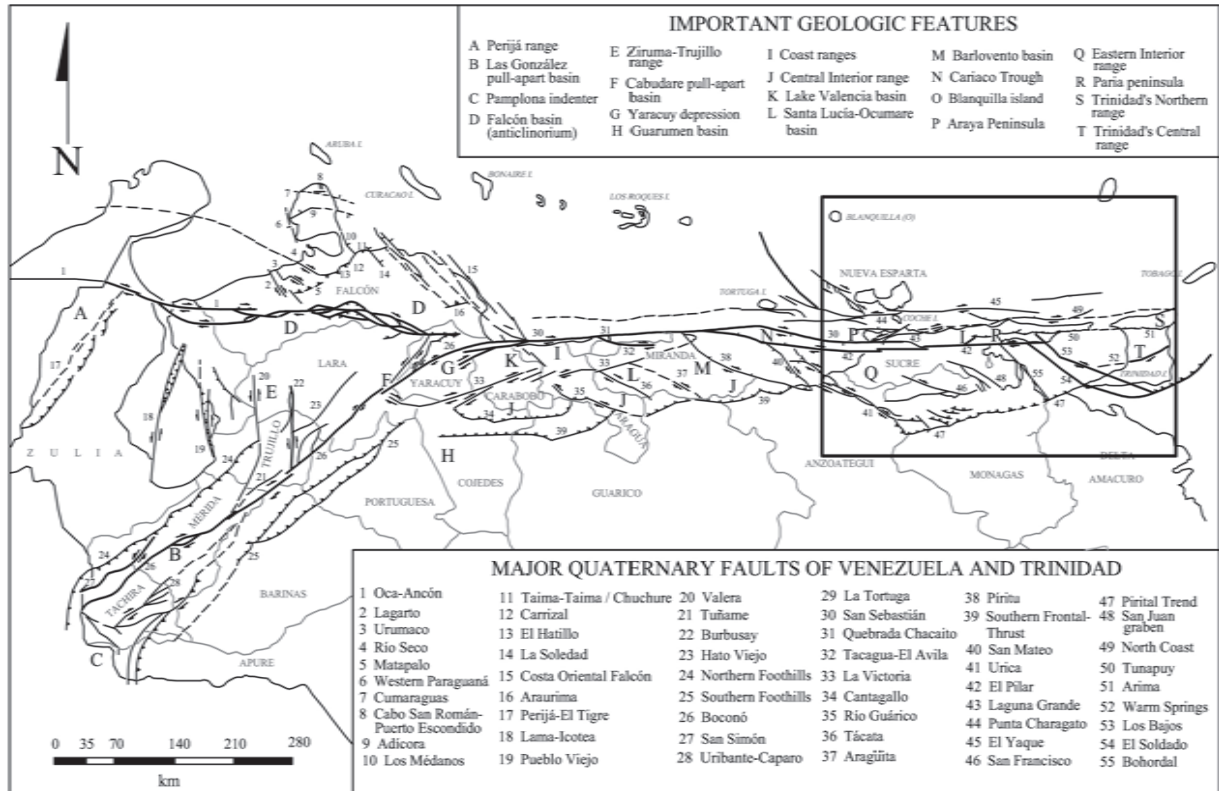


FIGURA 1. Mapa de las fallas cuaternarias de Venezuela (simplificado de Audemard *et al.*, 2000). Se identifica los nombres de las fallas, así como se provee la toponimia de algunas localidades importantes. El rectángulo en línea más gruesa identifica el área cubierta por los mapas de sismicidad instrumental presentados en lo sucesivo.

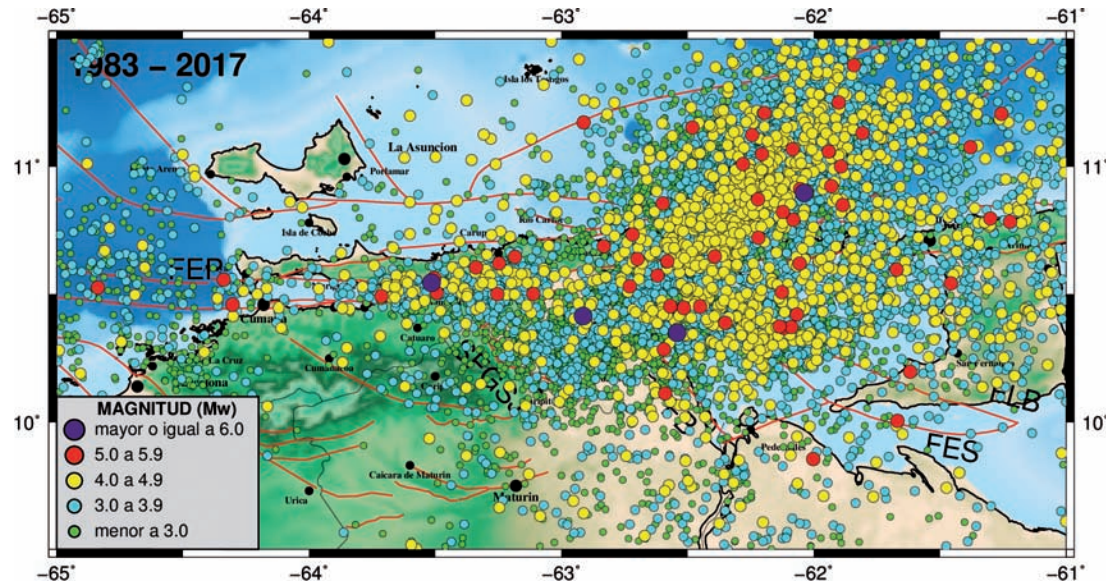
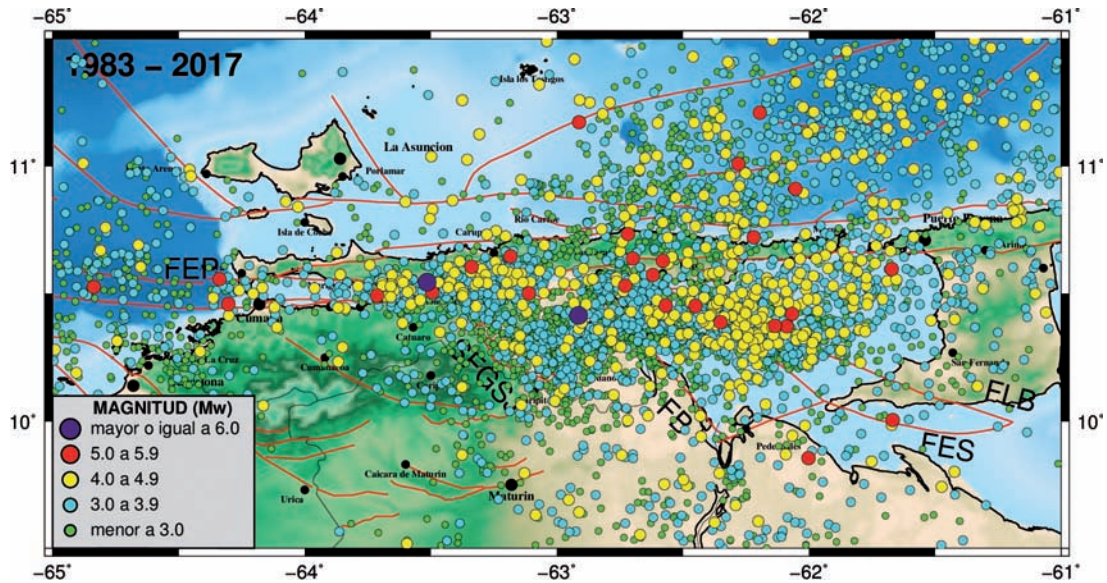
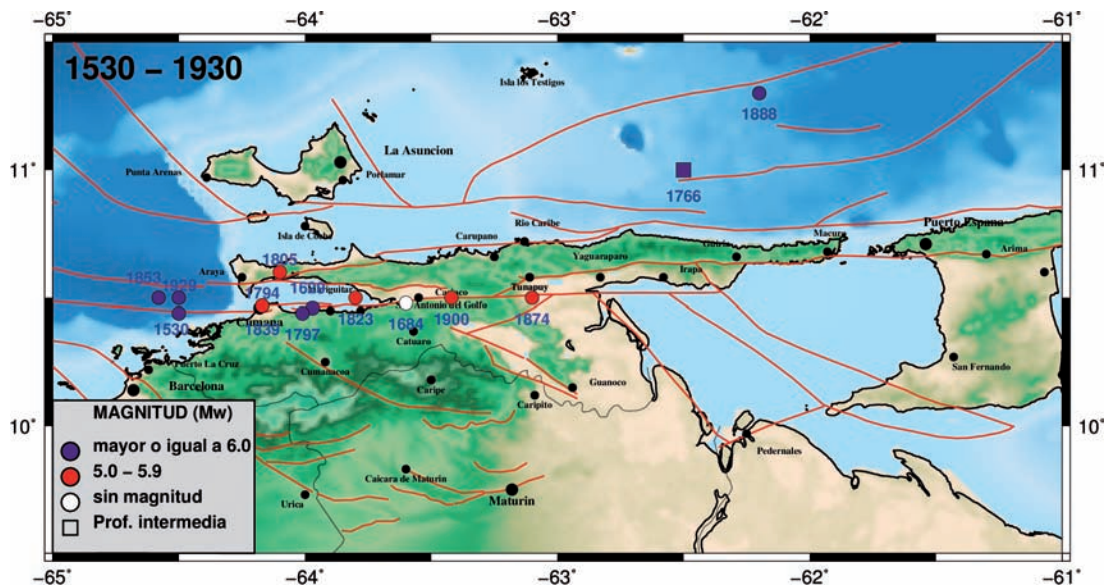


FIGURA 2. Sismicidad instrumental de Venezuela, para la ventana geográfica 9-12° de latitud norte y 61-65° de longitud oeste, toda profundidad confundida, a partir del Catálogo Sismológico de FUNVISIS. La actividad sísmica se representa sobre mapa de fallas cuaternarias de Venezuela compilado por Audemard *et al.* (2000), el cual está plasmado en la FIGURA 1), estando los sismos desagregados por rangos de magnitud por círculos de distinto diámetro, aumentando progresivamente con la magnitud, y distinto color. Aquí se plasma la actividad que cubre el período 1983-2017, con cierre al 31 de octubre de 2017. Abreviaturas de fallas: FB Falla Bohordal; FEP Falla El Pilar; FES Falla El Soldado; FLB Falla Los Bajos; y SFGSJ Sistema de Fallas del Graben del San Juan.



**FIGURA 3.** Sismicidad instrumental de Venezuela, para la ventana geográfica 9-12° de latitud norte y 61-65° de longitud oeste, de profundidad inferior a 25 km, a partir del Catálogo Sismológico de FUNVISIS. La actividad sísmica se representa sobre mapa de fallas cuaternarias de Venezuela compilado por Audemard *et al.* (2000), estando los sismos desagregados por rangos de magnitud por círculos de distinto diámetro, aumentando progresivamente con la magnitud, y distinto color. Todos los mapas de sismicidad aquí mostrados en lo sucesivo, comparten estas mismas características básicas. Aquí se plasma la actividad que cubre el período 1983-2017, con cierre al 31 de octubre de 2017.



**FIGURA 4.** Sismos históricos de Venezuela, para el período 1530-1929, con magnitud  $M_w \geq 5$ .

## MARCO GEODINÁMICO

La tectónica activa de Venezuela debe ser relacionada con la interacción entre las placas Caribe, Suramérica y Nazca e igualmente con otros bloques continentales de menores dimensiones entrampados entre las placas antes indicadas, donde esta interacción varía

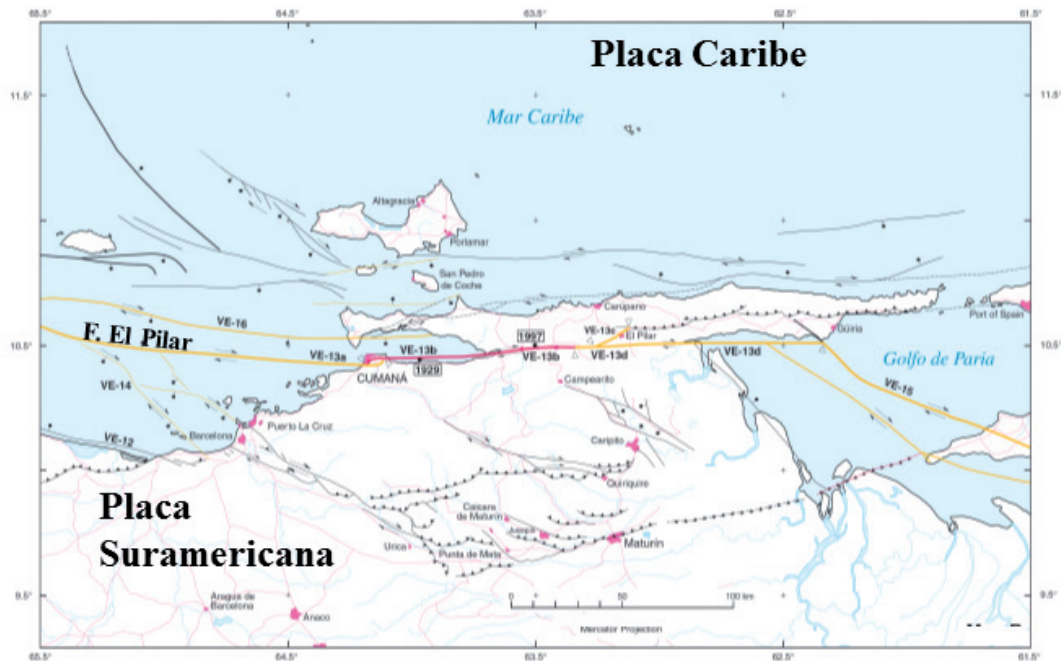
dramáticamente del Este hacia el Oeste (Audemard, 2002; Audemard *et al.*, 2005).

La falla El Pilar (FEP), en conjunto con otras fallas como: Boconó, San Sebastián, Los Bajos-El Soldado y/o Warm Springs, conforma un gran sistema transcurrente dextral (*e.g.*, Rod, 1956; Molnar y Sykes,

1969; Minster y Jordan, 1978; Pérez y Aggarwal, 1981; Stéphan, 1982; Aggarwal, 1983; Schubert, 1984; Soulas, 1986; Beltrán y Giraldo, 1989; Singer y Audemard, 1997; Audemard *et al.*, 2000; Pérez *et al.*, 2001a, 2001b; Weber *et al.*, 2001; Audemard *et al.*, 2005; Audemard, 2009, 2014, entre muchos otros), que facilita el movimiento relativo entre las placas Caribe y Suramérica. No obstante, esta frontera de placas no está representada por un accidente tectónico único (*e.g.*, Soulas, 1986; Beltrán, 1994) y más bien es una franja de deformación transpresiva (de hecho, transcurrente-compresiva) en el Oriente venezolano de más de 100 km de ancho (Audemard, 1993; Singer y Audemard, 1997; Audemard, 1998; Audemard *et al.*, 2005; Audemard y Castilla, 2016; FIGURA 1). La porción más oriental en territorio venezolano de este gran sistema de fallas dextrales lo constituye la falla El Pilar (FEP). Esta falla se extiende en dirección este-oeste por unos 350 km entre la fosa de Cariaco al Oeste y el golfo de Paria al Este. A excepción de un segmento en tierra de unos 80 km de longitud, entre los golfos de Cariaco y Paria en el estado Sucre, y las trazas que limitan los cerros de Caigüire en Cumaná muy brevemente, la traza activa de la falla de El Pilar es esencialmente submarina, tanto en mar afuera al Norte de la ensenada de Barcelona como en los golfos de Cariaco y Paria hacia el Este (Audemard *et al.*, 2000).

Es significativo señalar que la contribución o participación de esta falla en la migración de la placa Caribe hacia el Este con respecto a Suramérica, así como su cinemática, fue tema de discusión intensa, hasta la ocurrencia del sismo de Cariaco de 1997; ocasión en que su sentido de movimiento lateral derecho quedó claramente evidenciado y demostrado (Audemard, 1999a, 2006; 2011). Este debate aún se mantenía a pesar de que la traza activa de la falla de El Pilar había sido cartografiada con base en criterios geomorfológicos de actividad cuaternaria por FUNVISIS (1994), publicada luego por Beltrán

*et al.* (1996). Estos autores reportaron evidencias geomorfológicas diagnósticas de transcurrencia dextral a lo largo de su traza activa. Con base en esta cartografía, la traza activa de la falla de El Pilar es subdividida en cuatro segmentos o secciones (FUNVISIS, 1994; Beltrán *et al.*, 1996; Audemard *et al.*, 2000), de Oeste a Este, denominadas VE-13a a VE-13d en la FIGURA 5, respectivamente: 1) Una traza submarina de orientación este-oeste, al Oeste de Cumaná, que limita por el Sur la fosa o cuenca en tracción (*"pull-apart basin"*) de Cariaco, la cual se amortigua en los cerros de Caigüire en Cumaná, en un relevo transpresivo; 2) La segunda porción se extiende desde el flanco Norte del *"pop-up"* de Caigüire hasta la curvatura transpresiva de Casanay-Guarapiche, estando gran parte de su traza en el fondo marino del golfo de Cariaco; 3) Un segmento de unos 30 km de largo que diverge ligeramente hacia el ENE, extendiéndose entre los poblados de Río Casanay y El Pilar y conectándose con la falla de Tunapuy; y 4) Una cuarta porción de orientación este-oeste que cruza las zonas anegadizas de las Sabanas de Venturini, para luego correr en mar al Sur de la costa sur de la Península de Paria, antes de conectarse con el sistema de fallas de Los Bajos-El Soldado de orientación NO-SE (FIGURAS 1 y 5), y éste a su vez con las fallas de Warm Springs en territorio trinitario y un sistema inverso de orientación este-oeste ubicado al Sur de la costa de Trinidad. Hoy se establece con base en la sismicidad histórica (Audemard, 1999b, 2007; Altez y Audemard, 2008) y la cartografía submarina de la FEP (Audemard *et al.*, 2007) que el segmento VE13b funciona sismogénicamente como 2 sub-segmentos separados por la cuenca en tracción de Guaracayal: uno al Oeste de unos 30 km de largo capaz de generar sismos de hasta Mw 6,5 con periodos de retorno de unos 130-150 años, muy próximos a Cumaná, tales como 1628, 1797 y 1929 DC; y otro más oriental, de unos 70 km de largo, con sismos del orden de Mw 7,0 y recurrencias de al menos unos 300 años (1684 y 1997; Audemard, 1999b, 2007, 2011).



**FIGURA 5.** Mapa de fallas cuaternarias de Venezuela compilado por Audemard *et al.* (2000), donde se identifican los rasgos tectónicos y estructurales mencionados en el texto, así como la segmentación de la Falla El Pilar (FEP) propuesta por FUNVISIS (1994).

## METODOLOGÍA

La Red Sismológica Nacional de Venezuela, cuyo proyecto de ampliación y modernización fue preparado para 1998 e implementado en el período 2000-2002, permite, por su actual distribución espacial más amplia pero igualmente más densa, y con equipos de mayor sensibilidad y rango de frecuencias, ahondar en el mejor conocimiento de la sismicidad que ocurre en el país y su correlación con las fallas geológicas activas. Comparando la configuración actual de la Red Sismológica Nacional de Venezuela con la operada a partir del año 1983 por FUNVISIS, denominada RESVAC (Red de Estaciones Sismológicas de Apertura Continental) y constituida por 20 estaciones sismológicas corto período (FUNVISIS, 1983), sin duda que se ha alcanzado una mejor cobertura azimutal que reduce el umbral de detección de los sismos y mejora los cálculos de los parámetros tradicionales del foco (tiempo origen, localización hipocentral y magnitud). Esta nueva red, en pleno funcionamiento desde 2002, está conformada por 35 estaciones sismológicas equipadas con sismómetros banda ancha, modelo Guralp 40-T. Es por ello que los datos sismológicos aquí presentados son tratados de manera separada para los eventos pre- y post-2001, por provenir de 2 arreglos sismológicos bien disímiles. Así, los datos tratados de manera conjunta guardan

coherencia y significado estadístico representativo al ser obtenidos con el mismo conjunto de equipos en las ventanas temporales mencionadas.

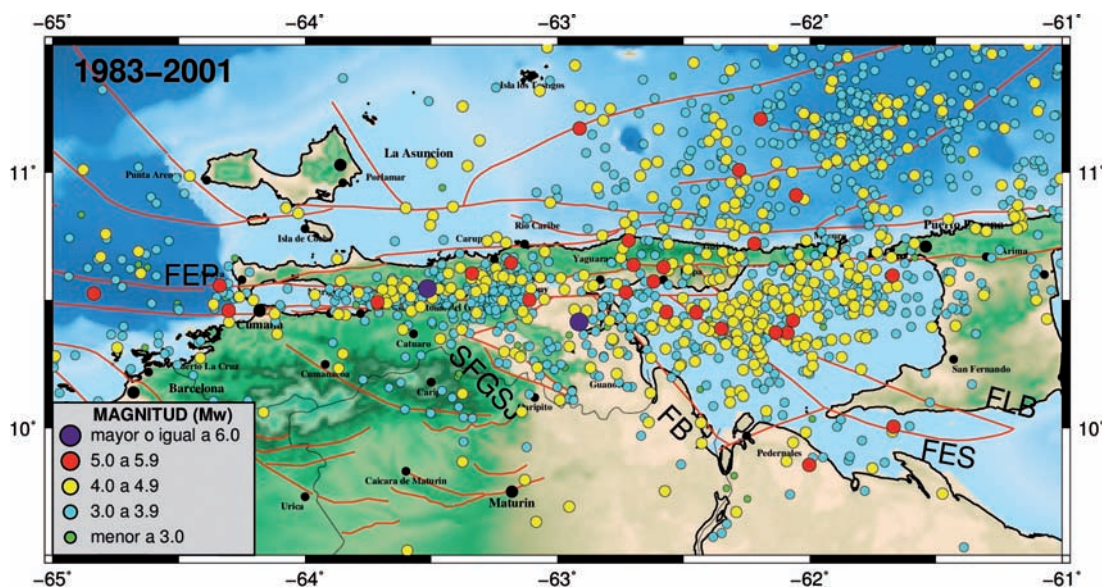
## RESULTADOS

A fin de visualizar los cambios espacio-temporales de la sismicidad en la región más nororiental del país, como hemos indicado previamente, se realizó una seriación de mapas de la actividad sísmica anual en el período 1983-presente, separados en 2 series correspondientes a cada red sismológica con la que ha contado el país (1983-2001 y 2002-presente). Para cada serie se fue incorporando la actividad de un año en particular a la acumulada previamente a ese año. Sólo se tomó en cuenta los sismos corticales (inferiores a 25 km de profundidad) y estos se desagregaron por rangos de magnitud ( $M_w < 3$ ,  $3 \leq M_w \leq 3,9$ ,  $4 \leq M_w \leq 4,9$ ,  $5 \leq M_w \leq 5,9$  y  $M_w \geq 6$ ), que a fines de diferenciación visual tienen sus epicentros representados cartográficamente con tamaños y colores distintos.

Del primer período analizado, correspondiente a la RESVAC (1983-2001; FIGURA 6), se puede apreciar lo siguiente: 1) la actividad sísmica claramente ocurre y se concentra al Este de la falla de Bohordal, ubicada en la costa suroeste del golfo de Paria, y de una línea

imaginaria en su prolongación hacia el noroeste, entre 1983-1997; 2) en la prolongación hacia el Este de la FEP, al Este de Güiria, hay un incremento muy marcado en los sismos en el rango  $3 \leq M_w < 5$  en el año 1988 (comparar FIGURAS 7A y 7B); 3) igual ocurre con la falla Los Bajos (FLB) al mismo momento y en el mismo rango de sismicidad, a pesar de mostrar siempre actividad desde el inicio del registro de sismicidad en 1983; 4) el sismo de Cariaco del 9 de julio de 1997 cambia este panorama, dado que previo a él hay poca actividad en el puente de tierra entre los golfos de Cariaco y Paria, a lo largo de la falla El Pilar (FEP; comparar FIGURAS 8A y 8B); 5) el sismo de Cariaco y sus réplicas van a realzar muy bien la traza de la FEP entre las poblaciones de Marigüitar, en el golfo de Cariaco, y Río Casanay. La nube de sismos conserva la forma descrita por Baumbach *et al.* (2004); y se extiende hacia el Este más precisamente

desde la depresión o cuenca en tracción de Guaracayal identificada por Audemard *et al.* (2007) a partir de sísmica de alta resolución (tipo “*sparker*” o centelleo) en el fondo del golfo de Cariaco (FIGURA 8); 6) esta actividad a lo largo del segmento más oriental de la FEP prosigue hasta hoy en el rango  $3 \leq M_w < 5$ , como lo registrará la moderna red de FUNVISIS (FIGURA 9); 7) el sismo de Cariaco de 1997 disparará una actividad sísmica cortical, que prosigue hasta hoy día, en el bloque tectónico ubicado al sur de la FEP y limitado por el sistema de fallas del Graben del río San Juan (SFGSJ) y la falla de Bohordal (FB) al Oeste y Este, respectivamente; 8) algo de actividad sísmica también ocurre en el bloque de Caripe, al Oeste del anterior, y también al Sur de la FEP; y 9) La falla de Bohordal se activa claramente con el sismo de Cariaco de 1997 (FIGURA 8).



**FIGURA 6.** Sismicidad instrumental de Venezuela, para el período 1983-2001, de profundidad inferior a 25 km, registrada por la anterior Red de Estaciones Sismológicas de Venezuela de Apertura Continental (RESVAC), activa en el período arriba indicado.

Por su parte, la nueva red (2002-2017) permitirá reforzar algunos rasgos: 1) así como la FLB acentúa su actividad en 1988, la falla El Soldado (FES) hace lo suyo a partir de 2002 (comparar FIGURAS 7 y 10; FIGURA 9); 2) un solo sismo cortical de  $M_w > 5$  ocurre en la región nororiental, en 2010, sobre la FEP, en proximidad al epicentro del sismo de Cariaco de 1997 (FIGURA 11); a diferencia del período 1983-2002, cuando unos 25 sismos de  $M_w > 5$  ocurrieron (FIGURAS 6 y 12); 3) la red captará la concentración de la actividad sísmica en cuatro nubes (FIGURA 9): a) la asociada a la FEP que se inicia y aún continúa entre

Guaracayal y Río Casanay, asociada a la ruptura del sismo de Cariaco de 1997; b) aquella de orientación NO-SE asociada a lo largo de las FLB y FES, cuya actividad se acelera para la primera en 1988 (FIGURA 7B) y en 2002 para la segunda (FIGURA 10); c) la falla de Bohordal se activa sísmicamente con la ruptura del sismo de Cariaco de 1997 (FIGURA 8); y d) por último, el bloque al Sur de FEP y entre las fallas del sistema del Río San Juan (SFGSJ) y Bohordal (FB) muestra una muy marcada actividad; inexistente a pobre previa al sismo de Cariaco (comparar FIGURAS 8, 9 y 10).

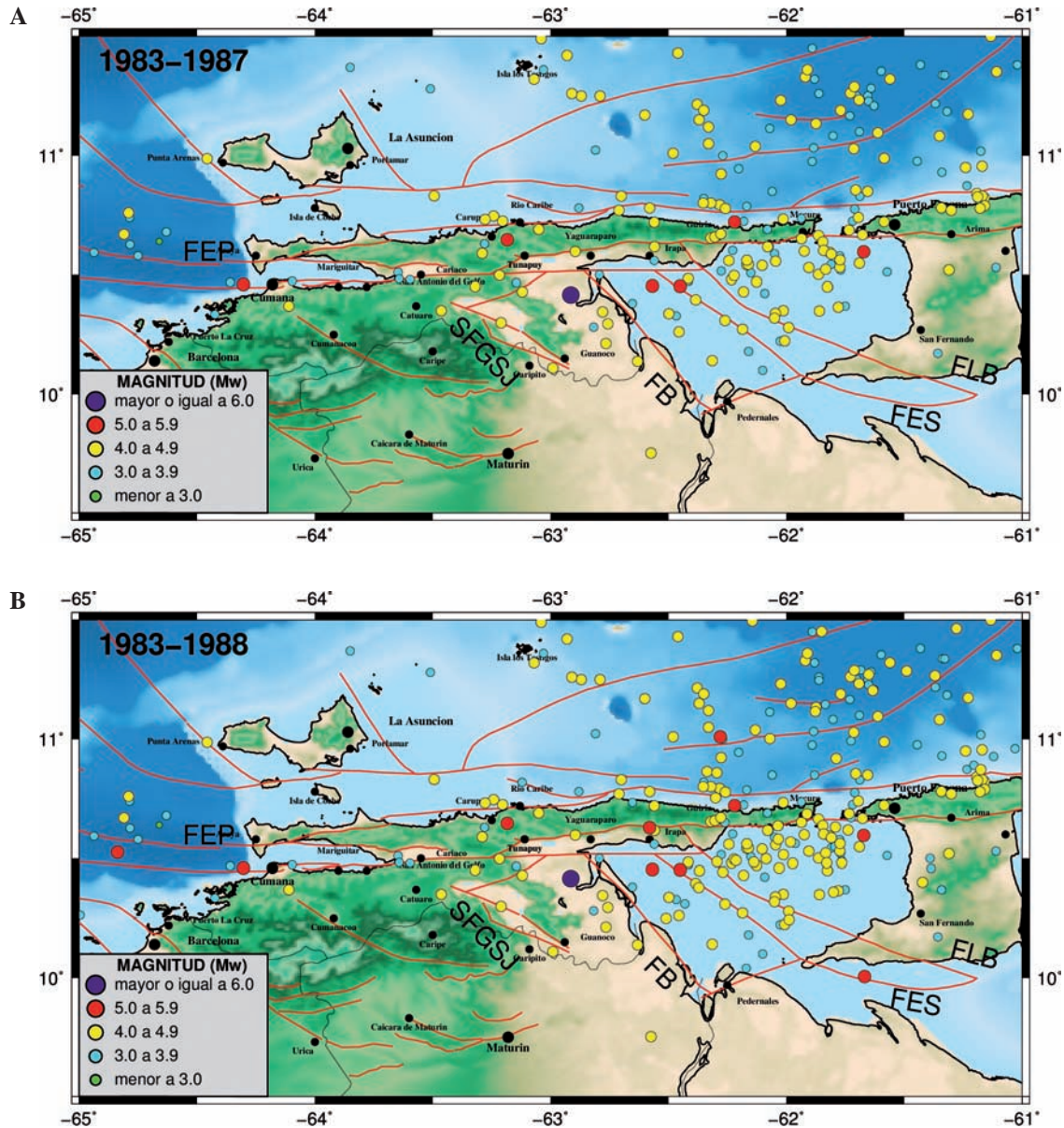


FIGURA 7. Sismicidad instrumental de Venezuela, de profundidad inferior a 25 km, registrada por la RESVAC, para el período: A. 1983-1987; B. 1983-1988. Mayores detalles se proveen en el texto.

En términos estrictamente cuantitativos, el histograma de frecuencia de la sismicidad instrumental para el período 1983-2017, desagregado por magnitud ( $N^\circ$  de eventos de determinada magnitud por año), mostrado en la FIGURA 12, confirma o refuerza varias aseveraciones ya aquí adelantadas, así como incorpora otras observaciones adicionales: 1) el umbral de detección de la red sismológica nacional cambia progresivamente en el lapso 2001-2002, no sólo al identificar mayor número de sismos, sino al localizar eventos de magnitud inferior a  $M_w 3,0$ , que no se

lograba con la red anterior RESVAC, disminuyendo el umbral de detección de sismos (comparar también FIGURAS 6 y 9). En consecuencia, el catálogo sísmico debe manejarse de manera separada en función de la instrumentación disponible, como se ha hecho en este trabajo; 2) el sismo de Cariaco de 1997 y sus réplicas sobresalen sobre la baja actividad de fondo regional que se percibía previamente; 3) el decaimiento de la actividad sísmica ligado al sismo de Cariaco se puede observar en la ventana temporal 1997-2000, al volver a valores de sismicidad “de fondo” en el año 2000;



4) la actividad sísmica en el rango Mw 3,0-4,9 no ha vuelto a los valores que solíamos tener en la región previo al sismo de Cariaco de 1997; lo cual justifica esta investigación; 5) el período 2001-2010 ha sido particularmente activo en el rango de magnitudes antes mencionado. El incremento y la distribución espacial de esta sismicidad se ha discutido aquí previamente con base en mapas de sismicidad en momentos particulares. Cabe indicar que la caída de actividad sísmica en los

últimos tres años (2015-2017) no es real y es sólo respuesta directa a los problemas de mantenimiento confrontados por la red sismológica instalada, que reduce el número de estaciones operativas, impactando negativamente la cobertura y el umbral de detección de la red. Se puede percibir en la FIGURA 12 que a pesar que se mantiene, o mismo incrementa la actividad sísmica de magnitud  $M_w \geq 4,0$ , el registro de los sismos  $M_w < 4,0$  se reduce sustancialmente.

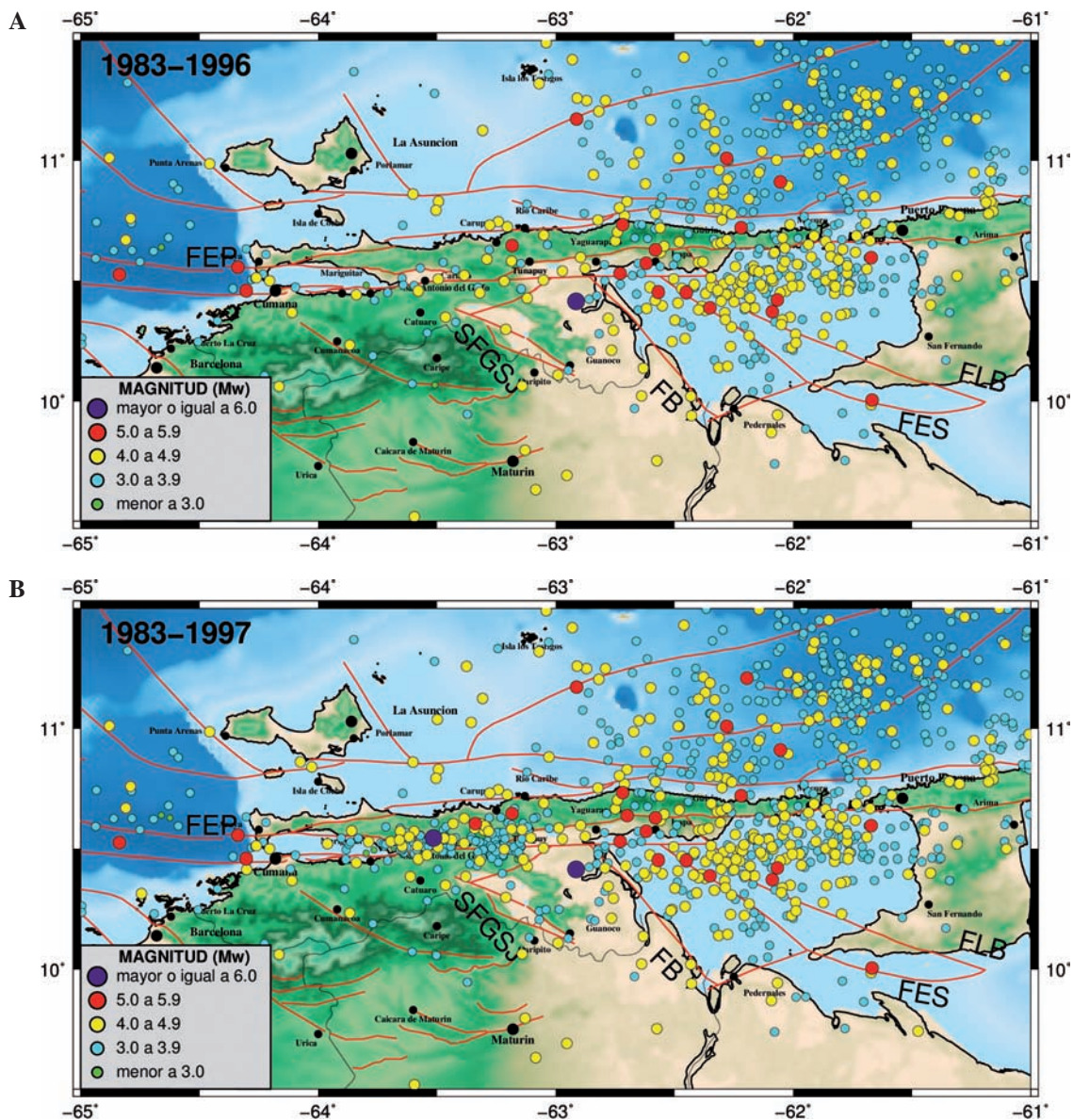
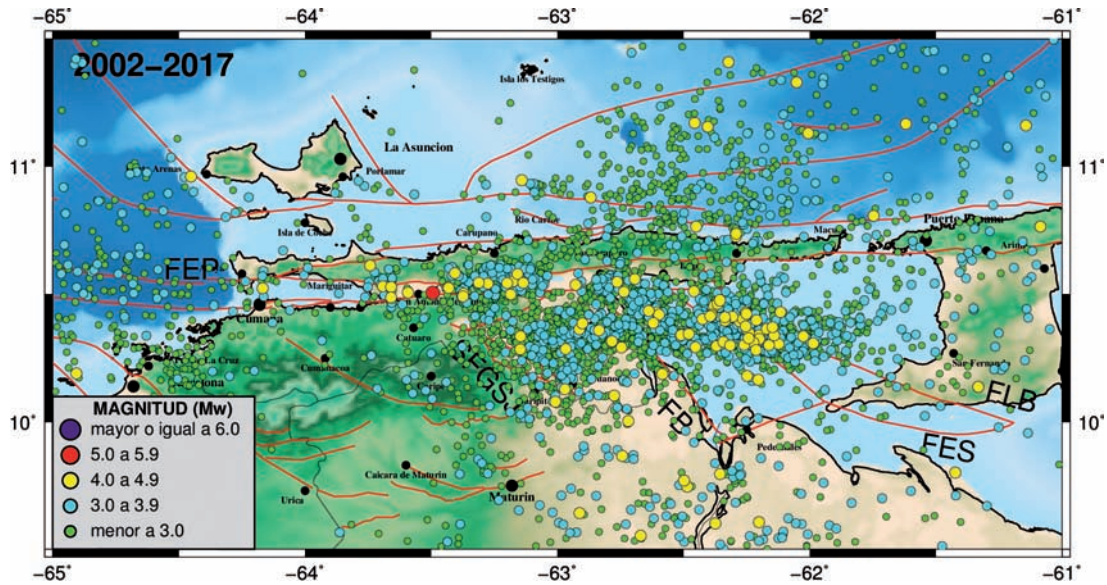
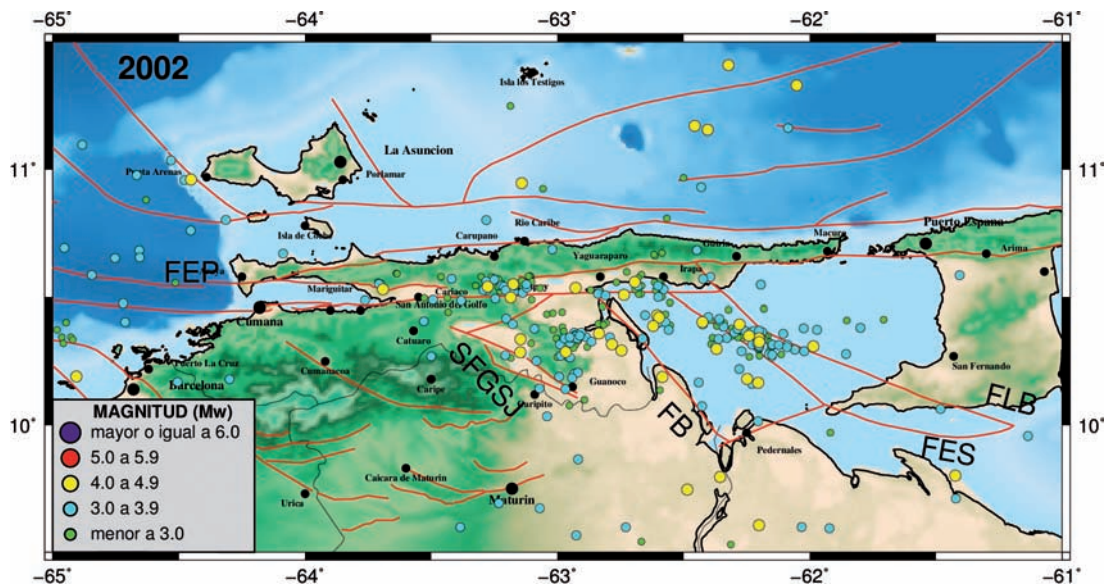


FIGURA 8. Sismicidad instrumental de Venezuela, de profundidad inferior a 25 km, registrada por la RESVAC, para el período: A. 1983-1996 (pre-sismo de Cariaco del 09 de julio de 1997); B. 1983-1997 (incluye al sismo de Cariaco de 1997 y los casi 6 primeros meses de réplicas).



**FIGURA 9.** Sismicidad instrumental de Venezuela, para el período 2002-2017, de profundidad inferior a 25 km, registrada por la moderna y actual Red de Estaciones Banda Ancha y tres componentes, con cierre al 31 de octubre de 2017. Nótese la profusa actividad sísmica, particularmente en el rango  $3 < M_w < 5$ , al Sur de la falla El Pilar y al Este del sistema de fallas del San Juan, que involucra todas las fallas cuaternarias siguientes: El Pilar, Graben del San Juan, Bohordal, Los Bajos-El Soldado.



**FIGURA 10.** Sismicidad instrumental de Venezuela, para el año 2002, de profundidad inferior a 25 km, donde se nota la clara actividad de la falla El Soldado (FES). A pesar de la corta vida de esta nueva red, ya se observa que la sismicidad superficial (<25 km) se aglutina a lo largo de la falla El Pilar, así como al Sur de ella y al Este del sistema de fallas del Graben del San Juan.

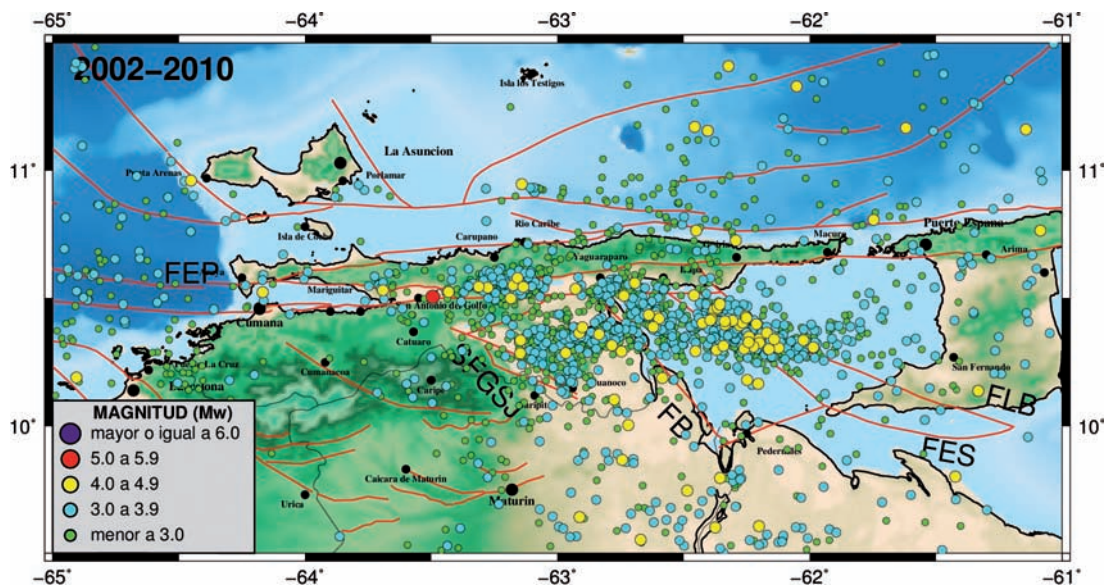


FIGURA 11. Sismicidad instrumental de Venezuela, para el período 2002-2010, de profundidad inferior a 25 km, registrada por la moderna y actual Red de Estaciones Banda Ancha y tres componentes. Obsérvese el único sismo de magnitud  $M_w$  superior a 5,0 registrado en lo que ha transcurrido de siglo XXI en la región bajo estudio, el cual está asociado con la ruptura del sismo de Cariaco de 1997. Igualmente, se aprecia muy bien la sismicidad superficial ( $<25$  km) profusa en frecuencia, que viene ocurriendo a lo largo de la falla El Pilar, así como al Sur de ella y al Este del sistema de fallas del Graben del San Juan, desde el año 2001.

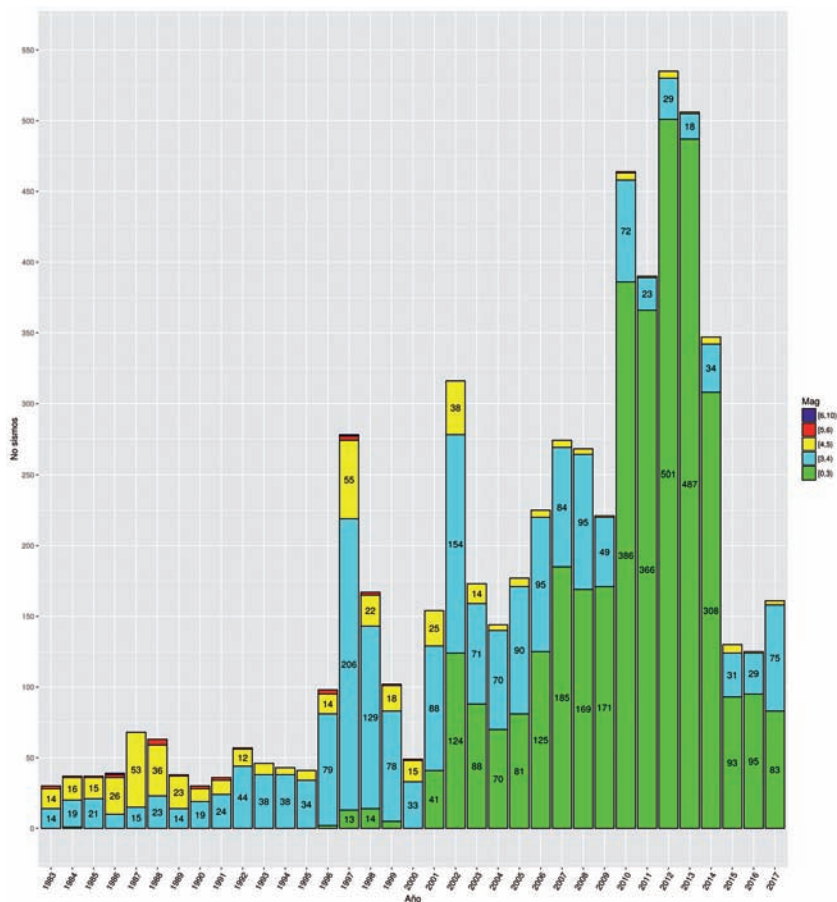


FIGURA 12. Histograma de frecuencia anual de sismos corticales (profundidad  $<25$  km) para la ventana temporal 1983-2017, desagregados por rangos de magnitud. Referirse al texto para explicaciones.

## DISCUSIÓN

Hemos aquí mostrado que la región oriental venezolana se ha visto sometida a una mayor actividad sísmica después de ocurrido el sismo de Cariaco del 09 de julio de 1997 de magnitud  $M_w$  6,9, a partir del análisis cualitativo-cuantitativo de la sismicidad instrumental sobre una ventana temporal de más de 30 años (1983-2017), donde el sismo de 1997 se ubica hacia el centro de la serie de tiempo analizada. A pesar de este marcado incremento, aún se puede identificar el decaimiento típico de la actividad en réplicas en los 2 a 3 años que siguen al sismo principal, previo a la aceleración de la actividad sísmica regional de interés para este estudio. Este incremento de la actividad sísmica no es aleatorio y sigue patrones definidos. La actividad sísmica se concentra bajo “nubes” de sismos corticales que se alinean a lo largo de las fallas El Pilar (FEP), el sistema de fallas del Graben del San Juan (SFGSJ), Los Bajos (FLB), El Soldado (FES) y Bohordal (FB), particularmente en sus porciones circunscritas al golfo de Paria. Es bastante claro igualmente, que la sismicidad bajo estudio se concentra al Sur de la FEP y al Este del Bloque tectónico de Caripe (al Este del sistema de fallas del Graben de San Juan –SFGSJ–); en concordancia con un plano de falla buzante al Sur, como definido por las réplicas del sismo de 1997 registradas por la red temporal instalada por el GFZ-Potsdam (Baumbach *et al.*, 2004). Es decir, la actividad sísmica detectada por vía instrumental en lo que transcurre de siglo en el Oriente venezolano, se concentra al Sur de FEP, y al Este del SFGSJ. De igual manera, se asocia geográficamente a las fallas El Pilar (FEP), en el segmento descrito como VE-13d en Audemard *et al.* (2000), Los Bajos (FLB), El Soldado (FES), Bohordal (FB) y sistema de fallas del Graben de San Juan (SFGSJ). Es de hacer notar que FEP y FLB-FES son parte integral de la frontera principal transcurrente entre las placas Caribe y Sudamericana (*e.g.*, Rod, 1956; Molnar y Sykes, 1969; Minster y Jordan, 1978; Pérez y Aggarwal, 1981; Stéphan, 1982; Aggarwal, 1983; Schubert, 1984; Soulas, 1986; Beltrán y Giraldo, 1989; Singer y Audemard, 1997; Audemard *et al.*, 2000; Pérez *et al.*, 2001a, 2001b; Weber *et al.*, 2001; Audemard *et al.*, 2005; Audemard, 2009, 2014), sobre la cual se acomoda entre 9 y 12 mm/a de movimiento lateral derecho (Beltrán, 1994; Audemard *et al.*, 2000; Pérez *et al.*, 2001a, 2001b; Weber *et al.*, 2001; Jouanne *et al.*, 2011; Reinoza *et al.*, 2015; Pousse *et al.*, 2016).

Combinado al hecho que se desconoce sismo histórico de profundidad cortical (lo cual excluye el sismo de 1766 por ser de profundidad intermedia; Lugo y Giraldo, 1989; Audemard, 1999b, 2007; Mocquet, 2007), desde el tercer viaje de Cristóbal Colón en 1498, por 520 años, en la región oriental venezolana, y conocido que los segmentos vecinos al Oeste de la FEP recurren cada 350-450 años (Audemard, 2011), siendo el más reciente (o último) el sismo de Cariaco de 1997, cabe preguntarnos si esta sismicidad inusitada, claramente ligada al sismo de 1997 y desplazada hacia el Este sobre el segmento más oriental de la FEP (VE-13d; vecino oriental del activado en 1997), con último evento desconocido por más de 500 años, y otras fallas asociadas (Bohordal y Los Bajos-El Soldado), no refleja alguna alteración, por transferencia de esfuerzos a través del medio rocoso a partir del segmento sismogénico de reciente activación, preparando al segmento más oriental de FEP para su eventual ruptura con un sismo de capacidad destructora, mayor a  $M_w$  7,0, o aproximándonos a esta situación a lo largo de cualquiera de las fallas con remozada y profusa actividad sísmica en este siglo XXI (El Pilar, Los Bajos, El Soldado, Bohordal y hasta sistema de fallas del Graben del San Juan), que potencialmente pudiese afectar toda las poblaciones venezolanas, y trinitarias, asentadas en proximidad a las costas del golfo de Paria, donde no se debe excluir la eventual asociación de un tsunami (sismo tsunamigénico). Debemos hacer mención que el Estado venezolano ha estado invirtiendo cuantiosamente en el desarrollo de la región y particularmente del estado Sucre, con la construcción del Complejo Industrial Gran Mariscal de Ayacucho (CIGMA) por varios lustros, en proximidad a Güiría; infraestructura que igualmente pudiese estar sometida a estos eventos naturales extremos.

Este segmento más oriental de la Falla El Pilar es considerado más lento (en el orden de 10 mm/a) que su vecino occidental (12 mm/a) y con un porcentaje de movimiento asísmico (*creep*) más elevado que el roto durante el sismo de Cariaco de 1997 (50% vs 40%; Jouanne *et al.*, 2011; Reinoza *et al.*, 2015). Esto sería justificación suficiente para que la recurrencia de sismos equivalentes de magnitud 7,0 + del segmento más oriental de FEP sea menor que el segmento contiguo al Oeste; o su período de retorno más largo que 350-450 años, como pareciese ser el caso. Igualmente, un menor bloqueo a lo largo del plano de falla buzante sur de este segmento oriental podría verse evidenciado por

una sismicidad de magnitud pequeña a moderada más profusa, previa a un gran sismo de magnitud superior a 7; lo cual justifica el presente llamado de atención.

## **CONCLUSIONES**

Parece bastante evidente, desde la sismicidad instrumental registrada en este siglo XXI, que el sismo de Cariaco del 9 de julio de 1997 ha puesto en movimiento las fallas identificadas como activas por vía geológica, en lo más nororiental del territorio venezolano, alrededor de e internas al golfo de Paria. Las fallas que muestran actividad sísmica exacerbada son: a) el segmento más oriental de la falla El Pilar (VE-13d), ubicado al Norte del golfo de Paria; b) la falla de Bohordal, que bordea la costa suroeste del mismo golfo; c) la falla Los Bajos-El Soldado, que cruza el subsuelo del golfo de Paria en dirección NO-SE, conectando la falla El Pilar con la falla Warm Springs, ubicada en la región central del territorio continental trinitario; y d) el sistema de fallas normales del Graben del San Juan. No nos queda claro cuál falla es la próxima a romper, pero todas las fallas están mecánicamente ligadas a la falla El Pilar, por lo que presagiamos que es ésta la que se está ajustando, forzando las fallas asociadas a moverse igualmente. Por otra parte, el segmento de la falla El Pilar VE-13d, con una tasa de movimiento similar a sus segmentos contiguos, debería recurrir similarmente a éstas, en el orden de unos 350-450 años, lo cual no ha hecho por más de 520 años, combinando el registro sísmico histórico e instrumental. Esto sustentaría esta hipótesis adicionalmente. El retardo en su activación con su segmento contiguo al Oeste, puede justificarse por la combinación de una mayor proporción de movimiento asísmico (menor acumulación de energía elástica en la misma ventana de tiempo) y una tasa de desplazamiento apenas más lenta (10 mm/a).

Dado que el interés no es alarmar más si alertar, las siguientes acciones preventivas deben tomarse: 1) acelerar el proceso de reducción de la vulnerabilidad social a través de: a) el dictado de talleres de formación sobre terremotos y tsunamis, a las comunidades, asociaciones de vecinos o juntas comunales, autoridades (gobernadores, alcaldes), cuerpos de atención, protección y seguridad (Policía, Médicos y Enfermeras, Bomberos, Protección Civil), entre otros. Hacer énfasis en las poblaciones costeras bajas, la posibilidad de verse afectados por olas tsunamis; b) en las instalaciones esenciales y de uso frecuente y masivo (hospitales, sede de Bomberos y Cuerpos de Policía, Institutos de Educación, Centros Comerciales, Salas de reuniones de cualquier índole, entre otros)

actualizar los planes de emergencia, o en su defecto generarlos, implementarlos y practicarlos; c) la generación e instalación de la debida señalética en caso de evacuación, tanto para sismos como tsunamis; d) la realización repetida y regular de simulacros de evacuación en caso de sismos y tsunamis, a todos los niveles comunitarios (residencia o edificación, calle, urbanización, población o ciudad) y con actuación de todos los autores (civiles, autoridades, tomadores de decisiones, etc); e) la activación masiva del Aula Sísmica del Municipio Ribero, con sede en Cariaco, enfocada hacia la formación preventiva de las poblaciones de la península de Paria; y f) la formación de nuevos multiplicadores en Prevención Sísmica. Cabe mencionar que algunas de estas actividades, a sugerencias de los autores, ya han sido puestas en práctica desde FUNVISIS en la región, en el transcurso del año 2017. 2) En lo concerniente a la reducción de la vulnerabilidad física, enfocar esfuerzos pertinentes de manera acelerada, en esta región que podría verse prontamente expuesta a un evento natural extremo (sismo/tsunami). Para el medio construido ya existente, realizar análisis de vulnerabilidad, tanto estructural como de sitio, de edificaciones esenciales conducentes a la toma de decisiones prontas y oportunas (abandono, reubicación, reforzamiento, etc.), en la medida de las posibilidades económicas de las cuales disponga el Estado venezolano; o en su defecto, los ciudadanos potencialmente afectados. Para las construcciones en curso o proyectadas a futuro, asegurarse de aplicar las normas sismorresistentes vigentes, y propiamente adaptadas a las condiciones propias del sitio (aplicación de ordenanzas de microzonificación sísmica, si las hubiere). Para las viviendas formales de 1 a 2 pisos el riesgo aparentemente no es mayor en caso de sismo, pero no necesariamente es el caso en la eventualidad de un tsunami, en función de su cota por encima del nivel medio del mar. Para las viviendas informales y auto-construidas, el escenario es siempre el más desfavorable. No obstante, FUNVISIS ha estado generando una serie de manuales para el Constructor Popular, nueve en total, que siendo bien aplicados y en forma masiva, podría sustancialmente reducir, a futuro, la vulnerabilidad de las viviendas más frecuentemente construidas en el territorio nacional.

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores desean expresar públicamente su gratitud a la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) por poner a nuestra disposición el catálogo sísmológico instrumental recabado sobre casi 35 años de manera ininterrumpida.

Extendemos nuestro agradecimiento a dos árbitros anónimos que revisaron esta contribución.

## REFERENCIAS

- Aggarwal, Y. (1983). Neotectonics of the Southern Caribbean: Recent Data, new ideas. *Acta Científica Venezolana*, 34(1), 17. Abstract.
- Altez, R., y Audemard, F.A. (2008). El sismo de 1629 en Cumaná: Aportes para una nueva historia sísmica del oriente venezolano. *Boletín Técnico IMME*, 46(2), 53-71.
- Audemard, F.A. (1993). Néotectonique, Sismotectonique et Aléa Sismique du Nord-ouest du Vénézuéla (Système de failles d'Oca-Ancón). PhD Thesis, Université Montpellier II, France. 369p + anexos.
- Audemard, F.A. (1998). Evolution Géodynamique de la Façade Nord Sud-américaine: Nouveaux apports de l'Histoire Géologique du Bassin de Falcón, Vénézuéla. *XIV Caribbean Geological Conference*. Trinidad-1995.
- Audemard, F.A. (1999a). El sismo de Cariaco del 09 de julio de 1997, edo. Sucre, Venezuela: nucleación y progresión de la ruptura a partir de observaciones geológicas. *VI Congreso Venezolano de Sismología e Ingeniería Sísmica*. Mérida, Venezuela.
- Audemard, F.A. (1999b). Nueva percepción de la sismicidad histórica del segmento en tierra de la falla de El Pilar, Venezuela nororiental, a partir de primeros resultados paleosísmicos. *VI Congreso Venezolano de Sismología e Ingeniería Sísmica*. Mérida, Venezuela.
- Audemard, F.A. (2002). Ruptura de los grandes sismos históricos venezolanos de los siglos XIX y XX, revelados por la sismicidad instrumental contemporánea. *IX Congreso Venezolano de Geofísica*. Caracas, Venezuela.
- Audemard, F.A. (2006). Surface rupture of the Cariaco July 09, 1997 Earthquake on the El Pilar fault, northeastern Venezuela. *Tectonophysics*, 424(1-2), 19-39. doi: 10.1016/j.tecto.2006.04.018.
- Audemard, F.A. (2007). Revised seismic history of El Pilar Fault, Northeastern Venezuela, from the Cariaco 1997 Earthquake and recent preliminary paleoseismic results. *Journal of Seismology*, 11(3), 311-326. doi: 10.1007/s10950-007-9054-2.
- Audemard, F.A. (2009). Key issues on the post-Mesozoic Southern Caribbean Plate boundary. *Geological Society, London, Special Publications*, 328, 567-584. doi: 10.1144/SP328.23.
- Audemard, F.A. (2011). Multiple trench investigation across the newly ruptured segment of the El Pilar fault in northeastern Venezuela, after the Cariaco 1997 earthquake. In: F.A. Audemard, A.M. Michetti, J. McCalpin (Eds.). *Geological criteria for evaluating seismicity revisited: 40 years of paleoseismic investigations and the natural record of past earthquakes* (pp. 133-157). GSA Special papers, Boulder. doi: 10.1130/2011.2479(06).
- Audemard, F.A. (2014). Active block tectonics in and around the Caribbean: A Review. In: M. Schmitz, F.A. Audemard, F. Urbani (Eds.). *El Límite Noreste de la Placa Suramericana - Estructuras Litosféricas de la Superficie al Manto (The Northeastern Limit of the South American Plate - Lithospheric Structures from Surface to the Mantle)* (pp. 29-77). Editorial Innovación Tecnológica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela/FUNVISIS.
- Audemard, F.A., Beck, C., Moernaut, J., De Rycker, K., De Batist, M., Sánchez, J., González, M., Sánchez, C., Versteeg, W., Malavé, G., Schmitz, M., Van Welden, A., Carrillo, E., and Lemus, A. (2007). La depresión de Guaracayal, estado Sucre, Venezuela: Una cuenca en tracción que funciona como barrera para la propagación de la ruptura cosísmica. *Interciencia*, 32(11), 735-741.
- Audemard, F.A., and Castilla, R. (2016). Present-day stress tensors along the southern Caribbean plate boundary zone from inversion of focal mechanism solutions: A successful trial. *Journal of South American Earth Sciences*, 71, 309-319. doi: 10.1016/j.jsames.2016.06.005.
- Audemard, F.A., Machette, M.N., Cox, J.W., Dart, R.L., and Haller, K.M. (2000). Map and database of Quaternary faults in Venezuela and its offshore regions. U.S. Geological Survey, Open-File Report 00-018, 64p + map.
- Audemard, F.A., Romero, G., Rendón, H., and Cano, V. (2005). Quaternary fault kinematics and stress tensors along the southern Caribbean from fault-

- slip data and focal mechanism solutions. *Earth-Science Reviews*, 69(3-4), 181-233. doi: 10.1016/j.earscirev.2004.08.001.
- Baumbach, M., Grosser, H., Romero, G., Rojas, J., Sobiesiak, M., and Welle, W. (2004). Aftershock pattern of the July 9, 1997 Mw=6.9 Cariaco earthquake in Northeastern Venezuela. *Tectonophysics*, 379, 1-23. doi: 10.1016/j.tecto.2003.10.018.
- Beltrán, C. (1994). Trazas activas y síntesis neotectónica de Venezuela a escala 1:2.000.000. *VII Congreso Venezolano de Geofísica*. Caracas, Venezuela.
- Beltrán, C., y Giraldo, C. (1989). Aspectos neotectónicos de la región nororiental de Venezuela. *VII Congreso Geológico Venezolano*, Barquisimeto, Venezuela.
- Beltrán, C., Singer, A., and Rodríguez, J.A. (1996). The El Pilar fault active trace (Northeastern Venezuela): neotectonic evidences and paleoseismic data. *3rd International Symposium on Andean Geodynamics*. Saint-Malo, France, 1: 153-156.
- Bezada, M.J., Levander, A., and Schmandt, B. (2010). Subduction in the southern Caribbean: Images from finite-frequency P wave tomography. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115, B12333. doi: 10.1029/2010JB007682.
- Centeno Graü, M. (1940). *Estudios Sismológicos*. Caracas: Litografía del Comercio.
- Clark, S.A., Sobiesiak, M., Zelt, C.A., Magnani, M.B., Miller, M.S., Bezada, M.J., and Levander A. (2008). Identification and tectonic implications of a tear in the South American plate at the southern end of the Lesser Antilles. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9(11), Q11004. doi: 10.1029/2008GC002084.
- FUNVISIS. (1983). Boletín Sismológico de Venezuela, enero-diciembre. 1(1): 1-81.
- FUNVISIS. (1994). Estudio Neotectónico y de Geología de Fallas Activas de la Región Nororiental de Venezuela. Proyecto INTEVEP 92-175. Informe inédito, 3 Vol. (1994).
- Gómez, J.M. (1990). *Historia de las fortificaciones de Cumaná*. 1º ed. Talleres de Impresos Oriente.
- Grases, J. (1979). Investigaciones sobre los sismos destructores que han afectado el oriente de Venezuela, Delta del Orinoco y regiones adyacentes. Informe Inédito para Intevep S.A. (1979). 107p.
- Grases, J. (1990). *Terremotos destructores del Caribe*. 1502-1990. 1º ed. Unesco-Relacis.
- Grases, J., Altez, R., y Lugo, M. (1999). *Catálogo de sismos sentidos o destructores*. Venezuela. 1530-1998. Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales/Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela, Editorial Innovación Tecnológica.
- Jouanne, F., Audemard, F. A., Beck, C., Van Welden, A., Ollarves, R., and Reinoza, C. (2011). Present-day deformation along the El Pilar Fault in eastern Venezuela: Evidence of creep along a major transform boundary. *Journal of Geodynamics*, 51, 398-410. doi: 10.1016/j.jog.2010.11.003
- Lugo, M., and Giraldo, C. (1989). The earthquake of October 21, 1766: its possible seismotectonic associations. *Bull. INQUA N.C.*, 12, 95. Abstract.
- Minster, J., and Jordan, T. (1978). Present-day plate motions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 83(B11), 5331-5354. doi: 10.1029/JB083iB11p05331.
- Mocquet, A. (2007). Analysis and interpretation of the October 21, 1766 earthquake in the Southeastern Caribbean. *Journal of Seismology*, 11(4), 381-403. doi: 10.1007/s10950-007-9059-x.
- Molnar, P., and Sykes, L. (1969). Tectonics of the Caribbean and Middle America Regions from focal mechanisms and seismicity. *GSA Bulletin*, 80(9), 1639-1684. doi: 10.1130/0016-7606(1969)80[1639:TOTCAM]2.0.CO;2.
- Pérez, O., and Aggarwal, Y. (1981). Present-day tectonics of southeastern Caribbean and northeastern Venezuela. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B11), 10791-10804. doi: 10.1029/JB086iB11p10791.
- Pérez, O.J., Bilham, R., Bendick, R., Hernández, N., Hoyer, M., Velandia, J.R., Moncayo, C., y Kozuch, M. (2001a). Velocidad relativa entre las placas del Caribe y Suramérica a partir de observaciones

- dentro del sistema de posicionamiento global (GPS) en el norte de Venezuela. *Interciencia*, 26(2), 69-74.
- Pérez, O.J., Bilham, R., Bendick, R., Velandía, J.R., Hernández, N., Moncayo, C., Hoyer, M., and Kozuch, M. (2001b). Velocity field across the Southern Caribbean Plate Boundary and estimates of Caribbean/South-American Plate Motion using GPS Geodesy 1994-2000. *Geophysical Research Letters*, 28(15), 2987-2990. doi: 10.1029/2001GL013183.
- Pousse Beltran, L., Pathier, E., Jouanne, F., Vassallo, R., Reinoza, C., Audemard, F.A., Doin, M.P., and Volat, M. (2016). Spatial and temporal variations in creep rate along the El Pilar fault at the Caribbean-South American plate boundary (Venezuela), from InSAR. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121, 8276-8296. doi: 10.1002/2016JB013121.
- Reinoza, C., Jouanne, F., Audemard, F.A., Schmitz, M., and Beck, C. (2015). Geodetic exploration of strain along the El Pilar Fault in northeastern Venezuela. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120. doi: 10.1002/2014JB011483.
- Rod, E. (1956). Strike-slip faults of northern Venezuela. *AAPG Bulletin*, 40(3), 457-476.
- Russo, R.M., and Speed, R.C. (1992). Oblique collision and tectonic wedging of the South American continent and Caribbean terranes. *Geology*, 20(5), 447-450. doi: 10.1130/0091-7613(1992)020<0447:OCATWO>2.3.CO;2.
- Schubert, C. (1984). Basin formation along Boconó-Morón-El Pilar fault system, Venezuela. *Journal of Geophysical Research*, 89, 5711-5718.
- Singer, A., y Audemard, F.A. (1997). Aportes de FUNVISIS al desarrollo de la geología de fallas activas y de la paleosismología para los estudios de amenaza y riesgo sísmico. En: J. Grases (Ed.). *Diseño sismorresistente. Especificaciones y criterios empleados en Venezuela* (pp. 25-38). Caracas: Academia de las Ciencias Naturales, Matemáticas y Físicas.
- Soulas, J.P. (1986). Neotectónica y tectónica activa en Venezuela y regiones vecinas. *VI Congreso Geológico Venezolano*, Caracas, Venezuela.
- Stéphan, J.F. (1982). Evolution géodynamique du domaine Caraïbe, Andes et chaîne Caraïbe sur la transversale de Barquisimeto (Vénézuéla). PhD Thesis, Université de Paris VI, Paris.
- VanDecar, J.C., Russo, R., James, D.E., Ambeh, W., and Franke, M. (2003). Aseismic continuation of the Lesser Antilles slab beneath continental South America. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B1), 18-12. doi: 10.1029/2001JB000884.
- Weber, J., Dixon, T., DeMets, C., Ambeh, W., Jansma, P., Mattioli, G., Saleh, J., Sella, G., Bilham, R., and Pérez, O. (2001). GPS estimate of relative motion between the Caribbean and South American plates, and geologic implications for Trinidad and Venezuela. *Geology*, 29(1), 75-78. doi: 10.1130/0091-7613(2001)029<0075:GEORMB>2.0.CO;2.
- 
- Franck A. Audemard M.  
ORCID: 0000-0003-2046-5916
- Leonardo Alvarado  
ORCID: 0000-0001-6836-9515
- Aura Fernández  
ORCID: 0000-0001-7923-0703
- Gloria Romero  
ORCID: 0000-0003-1169-0644
- Alejandra Leal  
ORCID: 0000-0002-5583-9650
- Raquel Vásquez  
ORCID: 0000-0002-8292-2601
- José Antonio Rodríguez  
ORCID: 0000-0002-0503-6307
- Alejandra Martínez  
ORCID: 0000-0002-3078-0605
- Ivette Barrios  
ORCID: 0000-0003-1145-3534
- 
- Trabajo recibido: noviembre 17 de 2017  
Trabajo aceptado: julio 11 de 2018