

CINCO DÉCADAS DE BÚSQUEDA DE LA HUELLA GEOLÓGICA DE LOS SISMOS PRE-HISTÓRICOS EN VENEZUELA: UNA ACTUALIZACIÓN

FRANCK. A. AUDEMARD M.

Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas –FUNVISIS–,
Departamento de Ciencias de la Tierra, Apartado Postal 76.880,
Caracas 1070-A, Venezuela. Fax: +58(0)212-257 99 77
e-mail: faudemard@gmail.com

Recibido: XXX de 2019

Recibido en forma final revisado: XXX de 2019

RESUMEN

En aquellas regiones del globo donde la sismicidad instrumental, junto a la histórica, resultan insuficiente para caracterizar la actividad o historia sísmica de una región, o de una falla o un conjunto de fallas, a fines de la estimación de la **amenaza sísmica (EAS)**, el uso de técnicas de investigación de geología clásica y geofísica moderna –agrupados bajo el nombre genérico de *paleosismología*– han sido de ayuda fundamental, necesaria e irremplazable. El presente trabajo nos brinda una actualización de los estudios paleosísmicos realizados en el país, a partir de los trabajos presentados por el autor en castellano en 2003 y en inglés en 2005; con particular énfasis a los ejecutados en el presente siglo XXI. El cúmulo de investigaciones paleosísmicas realizadas en territorio nacional a la fecha, atestiguan la muy larga tradición, así como de la experticia atesorada en la aplicación de esta disciplina, acumuladas sobre los últimos 50 años (1968-2018). Debe resaltarse que la mayoría de estos estudios, con raras excepciones (4 estudios), han sido llevados a cabo por FUNVISIS en el marco de EAS para diversos proyectos contratados por empresas muy variadas públicas y privadas. Finalmente, la investigación paleosísmica en Venezuela está mucho más avanzada que en el resto de América Latina, y se ubica entre las 10 más prolíficas mundialmente.

Palabras claves: Paleosismología, Terremotos Históricos, Amenaza Sísmica, Recurrencia

ABSTRACT

FIVE DECADES AT THE SEARCH OF THE GEOLOGIC IMPRINT OF PRE-HISTORIC EARTHQUAKES IN VENEZUELA: AN UPDATE

In those regions of the world where instrumental seismicity, along with historical seismicity, are insufficient to characterize the seismic activity or history of a region, a fault or a set of faults, towards a **Seismic Hazard Assessment (SHA)**, the use of modern geophysical and classical geological techniques (known under the generic name of *Paleoseismology*) have come in help in a fundamental, necessary and irreplaceable way. The current contribution on paleoseismologic studies carried out in Venezuela, presents an update from the papers by the author published in Spanish in 2003 and in English in 2005; particularly as to the Venezuelan investigations carried out in this XXI century. The wealth of paleoseismic studies made in Venezuela up to date, witness as to the very long tradition, as well as the gathered expertise in the application of this discipline, cumulated over 50 years (1968-2018). It is worth mentioning that most of such studies, with few rare exceptions (4 studies), have been performed by FUNVISIS in the frame of many SHA projects contracted by diverse public and private companies. Finally, the paleoseismic research in Venezuela is much ahead in comparison with other Latin-American countries, and probably among the 10 most prolific countries worldwide.

Keywords: Paleoseismology, Historical Earthquakes, Seismic Hazard, Return Period

INTRODUCCIÓN

En amplias regiones del globo, aún aquellas consideradas por los geocientíficos como límites de placas tectónicas activas –caracterizadas por la presencia de sismos, volcanes y el crecimiento del relieve montañoso–, los catálogos sismológicos ensamblados a partir de la captación y registro de **manera instrumental** de la actividad sísmica, resultan ampliamente insuficientes a fines ingenieriles en la estimación de la amenaza sísmica (EAS; o SHA, por las siglas en inglés de *Seismic Hazard Assessment*). La justificación a esta limitación reposa en que el desarrollo, implementación, ampliación y modernización progresiva de las redes sismológicas –tanto locales, nacionales, regionales o mundiales–, y el desarrollo del instrumental (entiéndase los sismómetros, hasta inclusive los equipos de transmisión de los datos captados por ellos en tiempo real por vía satelital) en sí no supera los 120-130 años, con inicios a fines del siglo XIX. En consecuencia, esta ventana temporal observacional resulta sumamente corta, por ende incompleta, para describir y caracterizar apropiadamente la actividad sísmica de una región o de sus fallas activas (**Figura 1**), dado que la EAS se basa principalmente en caracterizar o determinar la frecuencia con que los sismos de una determinada magnitud se repiten a través del tiempo en una región o por cada falla geológica identificada o reconocida; principalmente con interés en comprender el comportamiento a través del tiempo de los grandes terremotos con capacidad destructora sobre el medio construido y el hombre. Expresado de otra manera, se requiere determinar, regionalmente o por falla geológica con comprobada actividad cuaternaria (entiéndase en los 2,4 últimos millones de años), la recurrencia o período de retorno con que ocurre un sismo de una magnitud dada, lo cual en principio es descrito bastante bien por la relación Gutenberg-Richter, al menos para los sismos de magnitud inferior a M 5,5, la cual relaciona de forma semi-logarítmica el número acumulado de sismos de una magnitud o superiores ocurridos en la zona bajo estudio en una ventana de tiempo dada. Debemos necesariamente hacer un paréntesis aquí para refrescar 2 aspectos fundamentales de la mecánica de la fracturación del medio rocoso (e.g., Audemard & Singer, 1994, 1997; Singer & Audemard, 1997; Wells & Coppersmith, 1994): 1) Entre más grande o larga sea una falla geológica, más grande es el sismo que potencialmente puede producir; y 2) A más rápida sea la tasa o velocidad de desplazamiento

(o deformación) de una falla, menos tiempo transcurre entre 2 sismos consecutivos sobre esa falla o segmento de falla. A título ilustrativo, sabemos que las fallas más importantes en Venezuela, por ende las más largas y rápidas, son las fallas de Boconó, San Sebastián y El Pilar (e.g., Audemard *et al.*, 2000). Sus sismos superiores a Mw 7,0, a partir de numerosos estudios realizados (e.g., Audemard, 1997a, 1999b; Audemard *et al.*, 1999b, 2000, 2004; Alvarado *et al.*, 2007, 2008; Audemard, 2007, 2011, 2014), tienden a recurrir en el orden de unos 300 a 400 años. En consecuencia, en la ventana de observación instrumental de apenas un poco más de un centenar de años, siendo muy afortunados en términos estadísticos pero desafortunados por sus consecuencias, se captaría (o viviría) un único sismo con esas características, a lo sumo. Venezuela no escapa a esta realidad, razón por la cual el sismo de Caracas del 29 de julio de 1967 es el catalizador principal en la creación de la *Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas –FUNVISIS–* por decreto presidencial del 27 de julio de 1972, a casi cinco años después. Este ente gubernamental será creado con la visión futurista de aglutinar bajo un mismo techo las tres disciplinas científicas necesarias para ese momento, pero con vertiente aplicada al mundo ingenieril, para estudiar las fallas (Dpto Ciencias de la Tierra), su sismicidad (Sismología) y estimar su amenaza (Ingeniería Sísmica), con el fin último de generar el código sismorresistente nacional.

En tales circunstancias, el estudio de la actividad sísmica de las fallas en dichas regiones ha necesitado ser evaluada por períodos de tiempo más extendidos debido al período de retorno entre los grandes sismos destructores que superan la ventana de observación instrumental. En tal sentido, en aquellos países de larga trayectoria histórica tales como China, Japón y distintas civilizaciones mediterráneas (abarcando Europa, Cercano y Medio Oriente) con destaque de Italia y Grecia, las descripciones escritas (entiéndase: testimonios, descripciones, citas, menciones, anécdotas, recuentos, leyendas o bocetos, pinturas, grabados, entre otras formas de registro en papel u otro soporte) de destrucciones pasadas asociadas a terremotos, pero previas al período de la sismicidad instrumental, han permitido conocer mejor el comportamiento sismogénico (frecuencia y magnitud de los grandes sismos) de algunas fallas; y la repetición de los mismos en tiempos más recientes (durante el período instrumental) ha permitido calibrar la veracidad, confiabilidad y

precisión de las descripciones históricas (**Figura 1**). Sin embargo, esta disciplina, conocida como *sismología histórica*, ha demostrado ser insuficiente en algunas zonas del planeta, según Audemard (1998), como consecuencia de dos factores principalmente: a) existen países cuya tradición escrita es muy corta (aplicable básicamente a los continentes americano, australiano y africano), generalmente inferior a los cinco siglos (**Figura 1**), y la recurrencia de sus grandes terremotos se expresa en términos de cientos a miles de años (en ocasiones en decenas de miles de años); y b) algunas fallas han demostrado que los grandes terremotos no se rigen por la relación Gutenberg-Richter (número acumulado de eventos vs magnitud de los mismos), la cual sí es generalmente válida para sismos de magnitud inferior a m_b 5,5; sin olvidar que la calidad, cantidad y grado de preservación de los datos encontrados, compilados y utilizados en sismología histórica, están condicionados por una serie de circunstancias y condiciones amplia-

mente discutidas por Rodríguez & Audemard (2003), donde cabe indicar que la distribución espacial y la densidad poblacional de una región, así como su importancia política, económica y religiosa del momento, juegan un rol preponderante. Es relevante indicar que, en el caso de los países bajo dominación española, la importancia religiosa de los asentamientos poblacionales durante la colonia era clave, dado que los pocos moradores letrados eran en gran parte religiosos y se constituían en "cronistas" de sus parroquias ante su rey. Retomando el ejemplo de las fallas venezolanas antes empleado, y conocido que el registro escrito venezolano –sobre el cual se pudiese fundamentar los estudios de sismología histórica en el país- no antecede el tercer viaje de Cristóbal Colón en 1498 DC, es decir que no sobrepasa los 520 años, de manera muy optimista, no se podría develar más de 2 sismos que recurran cada 300 años, lo cual es de escaso valor estadístico para establecer recurrencia sísmica alguna.

VENTANAS DE SISMICIDAD (O ACTIVIDAD TECTÓNICA) SEGÚN ENFOQUES O DISCIPLINAS DIVERSOS

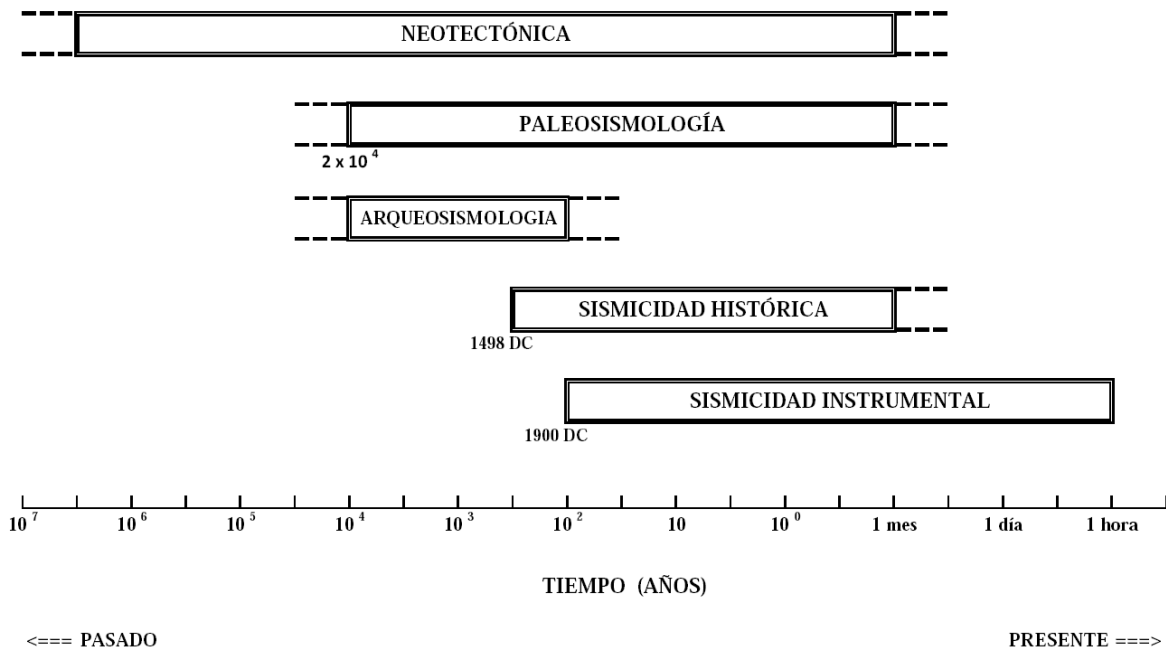


Figura 1. Ventanas de sismicidad estudiadas en el caso venezolano, dependiendo de la técnica, disciplina o enfoque empleado (modificado y actualizado de Audemard, 1998).

LA PALEOSISMOLOGÍA: DISCIPLINA DE VANGUARDIA

En respuesta a las dificultades confrontadas durante los estudios de sismicidad de una región, recabada tanto por la vía instrumental (sismicidad instrumental) como a través de la evaluación

crítica de la documentación histórica (sismicidad histórica) previamente desarrolladas, ha sido necesario recurrir a técnicas de investigación de geología clásica, apoyado en técnicas de investigación arqueológica y métodos de prospección geofísica no invasivos, para ampliar aún más la ventana de observación de la actividad de estos accidentes sismogénicos, para evaluar su comportamiento en el Reciente geológico (**Figura 1**). Dichos estudios, conocidos bajo el nombre genérico de *paleosismología*, persiguen por lo esencial evaluar los grandes terremotos del pasado –aquellos que tal vez no se rijan por la relación Gutenberg-Richter y no registrados en la historia de una región- con base en su expresión geomorfológica y geológica, y eventualmente geofísica, con miras a proveer información relevante para la estimación de la amenaza sísmica (EAS) de una región, para así hacer más seguras desde el punto de vista sismorresistente aquellas estructuras de gran importancia económica o de gran peligrosidad para la comunidad por su naturaleza (represas, plantas hidroeléctricas o termoeléctricas, túneles, centrales nucleares, viaductos, acueductos, gaseoductos, oleoductos y poliductos y refinerías petroleras y edificaciones esenciales –hospitales, escuelas, sedes de bomberos, entre otros, que deben servir o atender una eventual emergencia sísmica-); y de igual manera a aquellas edificaciones para habitación. Audemard & Michetti (2011) desarrollan ampliamente, de manera sucinta pero muy completa, el gran abanico de objetos geológicos que hoy en día se estudian con fines de determinar la *historia sísmica* –o cronología de sismo, la cual es la suma de los sismos instrumentales, históricos y pre-históricos que integran la totalidad de la actividad sísmica- de una región o de un accidente tectónico activo específico. Igualmente, estos autores clasifican las evidencias de actividad sísmica en dos grandes conjuntos: evidencias directas e indirectas, siendo las primeras aquellas asociadas directamente a la ruptura cosísmica de la falla generadora del sismo, es decir al plano de falla geológica o tectónica en sí, mientras las indirectas agrupan todas aquellas otras evidencias que atestiguan la ocurrencia del sismo. Audemard & Michetti (2011) igual discuten cuales pueden ser las herramientas empleadas para su estudio.

Audemard (1998) indica que la técnica paleosísmica más aplicada en los países preocupados por evaluar su amenaza sísmica es la excavación de trincheras, donde la técnica consiste en excavar una zanja o hueco (o un

conjunto de ellos bajo un arreglo específico) a través de la falla bajo estudio, de dimensiones variables, a fin de generar un afloramiento (sub-) vertical artificial (o una serie de ellos), que exponga los sedimentos afectados por la ruptura superficial asociada al movimiento de la falla durante la ocurrencia de los terremotos (**Figura 2**), como por la vibración propia del terreno que induce fenómenos asociados (licuación de suelos y movimientos de remoción en masa) o por la invasión de áreas emergidas por las olas tsunamis, para así cuantificar y datar las deformaciones. Es de recalcar que se debe emplear la técnica de excavación paleosísmica como último recurso cuando la región o la falla bajo estudio no ofrezca condiciones naturales de afloramiento (e.g., taludes y cortes de ríos; **Figura 3**) o exposiciones antrópicas preexistentes (e.g., cortes de carretera, minería a cielo abierto y obras civiles en general), considerando que siempre su puesta en práctica es onerosa, larga, engorrosa y pesada, indistinto del tamaño de la trinchera a excavar. Este autor igualmente indica que algunas fallas han reportado a través de esta técnica, períodos de retorno de decenas a cientos de miles de años, solo detectables por este medio, pudiendo citar como casos extremos las fallas de: Tenant Creek en Australia con recurrencia muy superior a 50.000 años y probablemente superior a 100.000 años (Crone *et al.*, 1992); Marryat Creek, también en el cratón precámbrico australiano, con períodos de retorno del orden de 100.000 años (Machette *et al.*, 1993); de Nimes en Courthezon, en la región del curso inferior del Ródano -Francia-, cuya última paleo-ruptura cosísmica ocurrió en los últimos 250.000 años (Grellet *et al.*, 1993); y La Moyenne Durance en el sureste francés, cuyo último evento ocurrió entre 27.000 y 9.000 A.P. (Ghafiri *et al.*, 1993). Más recientemente, esta técnica también ha sido extendida al estudio de la cronología de los (paleo-)tsunamis, particularmente en aquellas zonas costeras bajas y llanas, donde las olas tsunamis han invadido tierras emergidas en asociación de sismos tsunamigénicos (con deformación del fondo oceánico), o resultantes de otros fenómenos iniciadores de olas tsunamis (deslizamientos sub-aéreos o subacuáticos, colapsos de calderas volcánicas o de flancos de edificios volcánicos, explosiones volcánicas, impactos meteóricos, entre otros). En el caso venezolano, al igual que para el estudio de evidencias de licuación en ocasión de sismos contemporáneos (e.g., Audemard *et al.*, 1990; De Santis *et al.*, 1990; Audemard & De Santis, 1991; Beltrán *et al.*, 1992; Rodríguez *et al.*, 2009), el estudio de

tsunamis en lagunas costeras holocenas se ha adelantado con calicatas de sección horizontal cuadrada de 1 m x 1 m y con profundidad hasta que la mesa de agua lo permita (generalmente hasta unos 75 cm de profundidad; **Figura 4**). Cuando la secuencia sedimentaria expuesta en las paredes de la calicata muestra interés (entiéndase indicios de tsunamitas o perturbaciones en sedimentos blandos), se colectan núcleos no perturbados en tubos PVC, hincados a mano o a percusión con mandarina, hasta profundidades de 1,5-2 m (**Figura 5**; e.g., Audemard *et al.*, 2011b; Leal & Scremin, 2011; Leal *et al.*, 2014; Oropeza *et al.*, 2015).



Figura 2. Vista longitudinal de la trinchera excavada por retro-excavadora de pala de 1 m de ancho, a través de la falla de El Pilar, en la localidad de Carrizal de la Cruz (estado Sucre). Estas trincheras típicamente alcanzan longitudes próximas a los 20 m, profundidades de 2 a 4 m y secciones transversales trapezoidales de 4m de ancho al tope y 2 m a la base.



Figura 3. Falla de Urumaco, expuesta en talud de quebrada de afluente del río Urumaco, estado Falcón; afloramiento que será evaluado de igual manera que una trinchera excavada artificialmente.

De lo expresado en el párrafo anterior, se destila que la paleosismología desarrollada por medio de

la excavación de trincheras puede aplicarse tanto a evidencias directas (fallas geológicas específicas) como a evidencias indirectas (licuación de suelos, deslizamientos, tsunamis, entre otros; referirse a Audemard & Michetti (2011), en referencia a otros objetos paleosísmicos que pueden estudiarse por medio de la excavación de trincheras). Sin embargo, queda implícito que sólo es aplicable si la evidencia aflora en superficie, lo cual termina siendo una potencial limitación mayor en su aplicación. McCalpin (2009) señala que los sismos deben ser al menos de magnitud M_w 6,0-6,5 para que la ruptura cosísmica propague hasta la superficie, en el caso de evidencias directas. De nuestra experiencia venezolana, parecería que sobre fallas transcurrentes se requiere estar más próximos a M_w 7,0, al menos para fallas de gran extensión lateral. No obstante, Audemard *et al.* (1995, 1999a), al evaluar paleosísmicamente la falla de Urumaco, en un afloramiento natural de una quebrada afluente del río Urumaco (**Figura 3**), estiman magnitudes más bajas, en el rango M_s 5,8-6,4, para los 2 últimos sismos con expresión (ruptura) superficial, lo cual coincidiría con lo expresado por McCalpin (2009); y se vería validado por el reciente sismo de South Napa del año 2014, de sólo magnitud M_w 6,0, generado por un sistema complejo de fallas con cinemática transcurrente dextral con expresión superficial por al menos 12 km de longitud (Brocker *et al.*, 2015). Por su parte, se esperaría que la ruptura cosísmica en fallas normales acompañase sismos de magnitud próxima a M_w 6,0, y hasta inferior, dado que el movimiento cosísmico se ve facilitado por la acción de la gravedad; mientras que por la misma razón, las fallas inversas presentarían expresión superficial para sismos con magnitudes bien superiores a M_w 7,0. En tal sentido, la larga y letal secuencia sísmica de 2016-2017 en Italia central, iniciada con el sismo de Amatrice del 24 de agosto de 2016, ha puesto en evidencia que el umbral mínimo de magnitud de un sismo con ruptura superficial en fallas normales podría ser hasta inferior a 6,0, pudiendo ser de hasta 5,4, como en el caso del sismo cercano a la población de Visso de magnitud M_w 5,4 de fecha 26 de octubre de 2016 (e.g., Civico *et al.*, 2018; Villani *et al.*, 2018). Lo antes expresado pudiese interpretarse como una limitación mayor de los estudios paleosísmicos por vía de excavación de trincheras a partir de evidencias directas, dado que no se puede estudiar todo el espectro de sismos de distintas magnitudes que una falla pudiese generar. Sin embargo, los EAS en fin de cuenta se interesan más bien por los sismos con capacidad destructiva, sobre el hombre y el medio

construido; justificación por la cual producimos normas de construcción sismorresistente para reducir nuestra vulnerabilidad sísmica ante estos sismos de gran energía. Hoy día, está ampliamente comprobado que son los sismos generalmente de magnitud superior a 5,0 los que exacerbaban la vulnerabilidad humana, produciendo emergencias, desastres y catástrofes. Está comprobado que son sismos de estos órdenes de magnitud o superiores ($>M_w 5.0$) los que igualmente inducen evidencias indirectas detectables por medio de excavaciones. Castilla & Audemard (2007) a partir de una compilación mundial de evidencias de licuación descritas en ocurrencia de sismos contemporáneos, demuestran que el umbral de iniciación de este fenómeno vinculado a la sismicidad, es de ese orden de magnitud. De manera equivalente, pero a partir de intensidades macrosísmicas, la escala ESI-2007 (Michetti *et al.*, 2007; Silva *et al.*, 2008; AEQUA 2009; Audemard *et al.*, 2015), basada en efectos sísmicos ambientales (que calzan primariamente dentro de las evidencias indirectas), refuerza lo antes indicado.



Figura 4. Levantamiento de columna estratigráfica de calicata de aproximadamente de 1 m x 1 m en planta, abierta para exponer secuencia de la laguna costera de Unare (estado Anzoátegui) con eventuales evidencias de incursiones marinas extraordinarias (paleo-tsunamis). El colega J. Oropeza realiza el levantamiento.



Figura 5. Extracción de núcleo corto en PVC, contiguo a pared de calicata abierta en la laguna costera de Chacopata (estado Sucre). Los colegas Beck y Vallée (†) sostienen madero grueso, mientras J. Oropeza hinca con mandarina el “liner” de PVC.

A pesar que los estudios paleosísmicos por vía de excavación de trincheras sí resulta ser una de las herramientas más útiles y de las más ampliamente difundidas y aplicadas en paleosismología, expresar hoy día que esta disciplina se restringe a excavar trincheras es muy limitativo. Cabe señalar que existe un concepto errado muy común en considerar que ambos sean sinónimos o equivalentes (e.g., Caputo & Helly, 2008; Carrillo *et al.*, 2009). Se podía justificar tal confusión hace unos 25 años atrás, cuando la paleosismología floreció a través de los estudios por trincheras, pero no en tiempos más recientes. De hecho, la excavación de trincheras es sólo una técnica entre muchos enfoques paleosísmicos abordables. Para mayores detalles en este aspecto, referirse a McCalpin (1996), Yeats *et al.* (1997), Audemard (2003a,

2005), Michetti *et al.* (2005b), McCalpin (2009) y Audemard & Michetti (2011), entre otras revisiones. Esta confusión de ninguna manera es concebible hoy por hoy en los EAS de zonas de subducción oceánicas (o tipo B), que bordean grandes masas continentales, como es el caso del Cinturón de Fuego Circumpacífico, donde los asentamientos humanos han florecido y desaparecido alternamente a lo largo de la historia de la raza humana. Audemard & Michetti (2011) ampliamente discuten sobre la serie de enfoques que han sido desarrollados, así como sobre los diversos objetos geológicos identificados y estudiados sistemáticamente en las últimas décadas, a fin de construir la historia sísmica de tales regiones marinas próximo-costeras, dónde excavar una trinchera de exploración paleosísmica es evidentemente imposible hasta el presente.

Por lo tanto, la paleosismología a nivel mundial se ha convertido en una herramienta de trabajo de suma importancia en los estudios de evaluación de peligro sísmico (EAS) para una región dada, por permitir expandir hacia el pasado la ventana de observación de la actividad sísmica de una falla en particular (**Figura 1**), así como determinar la capacidad generadora de terremotos de la misma, expresada en términos de la magnitud del evento y su respectivo retorno. Adicionalmente, suministra información referente a: el desplazamiento cosísmico por evento, la tasa de desplazamiento promediada de la falla, la longitud de ruptura cosísmica, el tiempo transcurrido entre eventos, el tiempo transcurrido desde el último evento y la probabilidad de ocurrencia del próximo. Este conjunto de datos geológicos es útil para el desarrollo de modelos de segmentación de falla y de recurrencia sísmica, los cuales constituyen los fundamentos modernos del análisis probabilístico de la amenaza sísmica (EAS).

LA PALEOSISMOLOGIA POR TRINCHERAS EN VENEZUELA

En Venezuela, la práctica de evaluaciones paleosísmicas por trinchera es de larga tradición, ya que a fines de los años 1960, la empresa americana Woodward-Clyde & Associates excavó dos trincheras a través de la falla de Oca en el sector de la laguna de Sinamaica (al norte de Maracaibo), donde se pudo postular la ocurrencia de un sismo en esta falla durante los últimos 2.700 años (Cluff & Hansen, 1969; **Figura 6**). Resulta ser el primer estudio de este tipo realizado en toda América Latina; coetáneamente con otro similar (Clark *et al.*, 1972, en Yeats, 2001) realizado

sobre la falla Coyote Creek del sistema de fallas de San Jacinto, en California, Estados Unidos de Norteamérica, en 1968, después de la ocurrencia del sismo de Borrego Mountains del 9 de abril de 1968. Es decir, que son ambos estudios pioneros en su tipo para Las Américas y el mundo, ambos practicados por americanos sobre fallas rumbo-deslizante dextrales, y presentados en informes técnicos. Por otra parte, este estudio inicia la secuencia de evaluaciones paleosísmicas más sistemática y profusa del continente americano, detrás de los Estados Unidos de Norteamérica, donde se debe reseñar que numerosas excavaciones en esas latitudes son sólo ejecutadas para identificar/confirmar la presencia/ausencia de fallas geológicas activas en el subsuelo del medio urbano, lo cual conlleva a que una amplia porción de estos estudios permanecen como privados, en el anonimato o confidenciales y sin publicar. Al nivel internacional, además de Estados Unidos, sólo países como Japón (donde después del sismo de Kobe de 1994 se implementó un agresivo proyecto sistemático de excavaciones paleosísmicas en sus fallas continentales por más de 10 años), Italia y eventualmente Turquía y Mongolia han sido tan prolijos como Venezuela en la excavación de trincheras con fines de exploración paleosísmica. La diferencia fundamental entre los otros países y Venezuela, así como Japón, reside en el hecho que los estudios paleosísmicos son mayoritariamente realizados por extra-nacionales, generalmente bajo la figura de cooperación técnico-científica internacional. Al presente, un solo estudio con 2 excavaciones en Venezuela (Cluff & Hansen, 1969), el primero de todos, ha sido ejecutado exclusivamente por extranjeros.

A partir del final de la década de los años 70, FUNVISIS toma el relevo después del único estudio americano y precitado y copa esta línea de investigación de manera oficial, detectando por esta vía la ocurrencia en el Reciente geológico de grandes terremotos en diversas fallas, en el marco de contratos de servicios para las industrias petrolera y eléctrica nacional, así como ferroviaria; y más tarde, con fondos de investigación del estado (Fondo de Ciencia y Tecnología –FONACIT-). A su conocimiento, el autor del presente artículo conoce de sólo 4 otros estudios que no hayan sido ejecutados por FUNVISIS: 1) en la laguna El Juncal, entre Barcelona al Este y el Complejo Petroquímico José Antonio Anzoátegui (Hoces o Jose) al Oeste, en el estado homónimo, una empresa privada venezolana de estudio de suelos y geotecnia excavó, a solicitud de MENEVEN en 1982 y con

la asesoría del Dr. Clarence Allen del Caltech de California, trincheras de exploración de fallas activas en los sitios escogidos para la instalación de depósitos de combustible presuntamente ubicados en la trayectoria de ramales de la falla de San Mateo evidenciados por Soulas *et al.* (1981) en las unidades geológicas cuaternarias costeras onshore y por INTEVEP por medio de geofísica somera offshore, las cuales habrían resultado negativas (Singer, A., com. per., 2019); 2) Audemard (1997), para un lote a desarrollarse entonces en el mismo complejo petroquímico, excava una trinchera de una decena de metros para confirmar la presencia de una falla con actividad cuaternaria surcando el lote; trabajo ejecutado para la empresa Coral 83-Ingeniería de Consulta; 3) En la región central, el Ing. Acosta, para la misma empresa consultora, entre finales del 2007 y comienzos del 2008, ejecuta dos trincheras exploratorias al suroeste del lago de Valencia, buscando identificar si las deformaciones superficiales observadas en la Zona Industrial de Valencia, sector Flor Amarillo (estado Carabobo), tenían relación con el sistema de fallas La Victoria, cuyos resultados fueron publicados por Acosta (2009); y 4) uno realizado por la Universidad de los Andes, con la asesoría del Dr. Steve Wesnousky de la Universidad de Reno, el cual lamentablemente no arrojó resultados (Reina Aranguren, com. per., 2014), por correr con la misma suerte que aquellas excavadas en el piedemonte norte, en el cercano sector de Arapüey-Alguacil, por FUNVISIS (1987b), en el año 1986. Como bien lo explica Audemard (2005), estas excavaciones estaban condenadas al fracaso porque se trató de explorar un frente inverso ciego, asociado a una zona triangular o prisma intracutáneo, o a pliegues en propagaciones de fallas inversas, cuya geometría sólo se entendería después con los trabajos doctoral de Felipe Audemard (Audemard, 1991, 1997) y de Maestría de Leonardo Duerto (Duerto, 1998; Duerto *et al.*, 1998, 2006), ampliamente ilustrados por líneas sísmicas convencionales de la industria petrolera nacional. Aprovechamos para recalcar que estas 2 excavaciones han sido los únicos fracasos paleosísmicos de parte de FUNVISIS en una trayectoria que está por cumplir 40 años próximamente. El éxito de FUNVISIS ha siempre residido en la ejecución minuciosa y detallada de una evaluación neotectónica previa, en la cual los accidentes tectónicos cuaternarios han sido plasmados en una extensa cobertura de información sobre las unidades aluviales cuaternarias producida en el país por el ex-Ministerio de Obras Públicas (MOP, División de

Edafología) y por COPLANARH en la década del 60 y 70 y sin equivalente en otros países de América latina, así como muy bien cartografiados y caracterizados con base en criterios geomorfológicos diagnósticos de actividad tectónica cuaternaria adaptados de otras latitudes (con contextos transcurrentes similares; e.g., Schubert, 1982; Soulas *et al.*, 1986) o desarrollados en nuestro país, y en países vecinos latinoamericanos (propios de frentes orogénicos o de fajas plegadas y corridas; e.g., Audemard, 1999a, 2003b; López *et al.*, 2003, 2005; Ollarves *et al.*, 2006; Perucca *et al.*, 2012; 2013; Audemard *et al.*, 2016); aunado a una comprensión integrada geológica, sedimentológica, geomorfológica y ambiental del sitio de trinchera finalmente seleccionado para su excavación. A título ilustrativo, Audemard & Bellier (1997) detallan cómo los sitios de trinchera fueron seleccionados a lo largo de la falla de Boconó en la zona del Páramo de Mucubají, usando los criterios desarrollados en detalle en Audemard (2003a; 2005). De igual manera, Audemard (1989) y Michetti *et al.* (2005a) explican profusamente la metodología empleada en los estudios neotectónicos y paleosísmicos al nivel mundial; ampliamente validados en Venezuela por los estudios ejecutados por FUNVISIS.

Cabe mencionar entre los diversos estudios realizados en este campo por esta institución (**Figura 6**), los llevados a cabo por: (1) Funvisis (1987a), cuyos resultados fueron publicados por Soulas & Giraldo (1994), quienes concluyen que las fallas de Mene Grande y Valera (10 y 9 en la **Figura 6**) presentan respectivamente retornos entre 1.200 y 2.000 años para sismos de magnitud 6,2 y 6,9; (2) Beltrán *et al.* (1990) sobre la falla de Boconó en la población de Buena Vista (al suroeste de Barquisimeto; 15 en la **Figura 6**), donde evidenciaron la ocurrencia de sismos de edad holocena; (3) Beltrán *et al.* (1996; 1999) sobre la falla de El Pilar (33 en la **Figura 6**), donde se determinó una recurrencia del orden de 900 a 1.200 años para sismos de magnitud superior a 7; y (4) Audemard *et al.* (1995; 1999a) sobre la falla de Urumaco –Falcón septentrional por medio de un afloramiento natural (4 en la **Figura 6**), donde establecieron la ocurrencia de dos sismos moderados (magnitud entre 5,8 y 6,4) en los últimos 20.000 años. Todos estos casos de estudio, como muchos otros en territorio venezolano, demuestran que todos los sismos identificados/interpretados escapan a cualquier evaluación de sismología histórica (limitada a escasos 520 años de observación), dado que han

ocurrido claramente en tiempos previos a la colonia española; son todos definitivamente prehistóricos (**Figura 1**). También deseamos hacer hincapié sobre otros sismos pre-hispánicos, ocurridos en el sistema de fallas de Oca-Ancón al este del lago de Maracaibo (en las llanuras de Buchivacoa), en el noroccidente venezolano – *sistema considerado por muchos geólogos como tectónicamente inactivo*-, los cuales fueron detectados por medio de trincheras de investigación paleosísmica. Dicha evaluación arrojó que este rasgo tectónico ha generado sismos de magnitud cercana a Ms 7,5 durante el Holoceno (últimos diez mil años) y con períodos de retorno que oscila entre los 2.000 a 4.500 años para el segmento estudiado del sistema (Audemard, 1993a y b; 1994; 1996a; Audemard & Singer, 1994; 1996). Es probable que tal aseveración referente a su inactividad se haya basado en la bajísima actividad sísmica contemporánea registrada en dicho sector – aparenta ser un gap sísmico (Audemard, 2002)-, lo cual fue ulteriormente reforzado por un estudio de sismicidad histórica realizado por Lugo *et al.* (1992), quienes determinaron que el noroccidente venezolano no reporta ningún sismo histórico de intensidad MM superior a VII; es decir de magnitud superior a Ms 6. Destaquemos que la confrontación de los datos paleosísmicos con la información sísmica existente, tanto histórica como instrumental, conlleva a pensar que la quiescencia de dicho sistema de falla puede ser presagio de la cercanía de un próximo gran terremoto en este sector o segmento del sistema de fallas de Oca-Ancón, con epicentro al este de Maracaibo, tal como sugerido por Audemard (1993a y b; 1994; 1996; 2002).

CRONOLOGÍA DE ESTUDIOS PALEOSÍSMICOS EN VENEZUELA

En el siglo pasado

Un primer ensayo cronológico sobre los estudios paleosísmicos en Venezuela es realizado por Audemard (2003a) –de donde es extraída gran parte de la presente sección de este trabajo–, aunque en éste se incorporan aspectos no tratados en el estudio previamente señalado dado que se enfocaba exclusivamente en estudios paleosísmicos realizados a expensas de trincheras.

Como hemos indicado previamente, las evaluaciones paleosísmicas por trinchera se inicia a fines de los años 1960 en Venezuela, con dos excavaciones en la falla de Oca, en el sector de la laguna de Sinamaica ubicada al norte de

Maracaibo (1 en la **Figura 6**), por parte de la empresa americana Woodward-Clyde & Associates en 1968 (**Tabla 1a**). A pesar de los numerosos problemas técnicos presentados durante su excavación (materiales arenosos sueltos muy inestables y altamente saturados en agua), que determinaron la poca profundidad de penetración de las trincheras de exploración (del orden de 7 pies), se pudo postular la ocurrencia de un sismo en esta falla durante los últimos 2.500-2.700 años (Cluff & Hansen, 1969). Otro de los problemas referidos por los propios autores concernía a la gran homogeneidad (uniformidad) de los tipos litológicos presentes que dificultaron la observación de las deformaciones en las paredes de la excavación; esto atribuible al hecho de haber cortado sólo cordones litorales holocenos, compuestos por materiales granulares de tamaño arena poco cohesivos y sin estructuración interna fácilmente visible (ausencia de laminación/estratificación).

Casi una década después, FUNVISIS relanza este tipo de estudios a partir del inicio de la década de los años 80, convirtiéndose en el ente que ha aplicado y desarrollado esta disciplina en Venezuela desde entonces y hasta el presente, salvo unas contadas excepciones que hemos enumerado previamente; lo cual le ha permitido detectar por esta vía la ocurrencia en el Reciente geológico de grandes terremotos en diversas fallas (**Tabla 1a**), en el marco de contratos de servicios para las industrias petrolera y eléctrica nacional, el instituto de ferrocarriles del estado, y más recientemente en proyectos científicos financiados por FONACIT.

En 1980, Funvisis es llamado a realizar los estudios de amenaza sísmica para el Proyecto Hidroeléctrico Uribante-Caparo, al sureste del estado Táchira. Aprovechando los gigantescos movimientos de tierra ejecutados para la deforestación de los vasos y para la construcción de las presas de dicho proyecto, hoy conocido como Desarrollo Hidroeléctrico de Uribante-Caparo –DESURCA–, se acometen trincheras de evaluación paleosísmica dirigidas por primera vez por personal venezolano y asesoradas por colegas franceses, entre ellos el Dr. Jean-Pierre Soulas y Jean-Claude Bousquet, americano (Dr. Clarence Allen) y venezolano (Dr. Carlos Schubert del IVIC). En vista de la disponibilidad de la maquinaria pesada, aunado a ninguna restricción presupuestaria, el grupo de Ciencias de la Tierra de FUNVISIS emprende, ejecuta y estudia 22 trincheras distribuidas sobre las fallas de Caparo,

Doradas y Uribante (Tabla 1a y 7 y 8 en la Figura 6). La evaluación paleosísmica en este proyecto no va a ser sólo monumental por el número de excavaciones ejecutadas, sino por la dimensión de las mismas. Algunas de éstas excavadas con retroexcavadora –jumbo- alcanzaron hasta los 15 m de profundidad. No obstante, aunque los resultados paleosísmicos fueron incorporados a los cálculos ingenieriles del

proyecto, los mismos fueron escasamente divulgados por sus autores (Soulas & Aggarwal, 1982; Singer & Soulas, 1983; Soulas, 1983, 1985, 1988), pero ha podido salir a relucir que dichas excavaciones confirmaron la activación durante el Holoceno y el Pleistoceno superior de los accidentes tectónicos presentes en los sitios de presa de La Honda y Borde Seco (Funvisis, 1983; Singer, com. per., 2000).

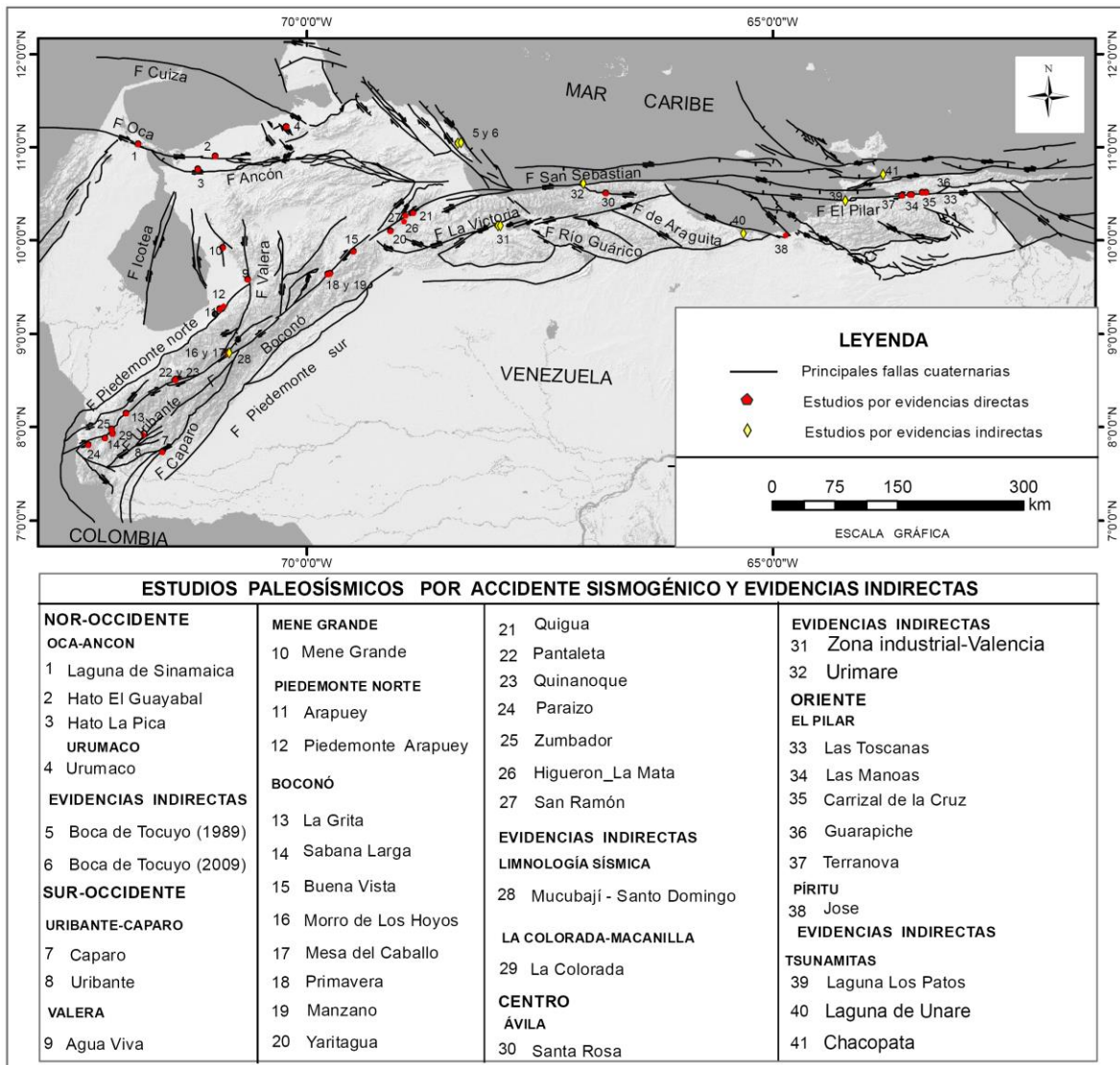


Figura 6. Mapa inventario de las localidades estudiadas en Venezuela sobre los últimos 50 años (realización por Luz María Rodríguez de FUNVISIS, actualizada a partir de Audemard, 2005).

Durante la vigencia de la cooperación del Dr. Jean-Pierre Soulas (1980-1987) con FUNVISIS, en el marco de la Cooperación Técnica Franco-Venezolana, varias trincheras de evaluación paleosísmica fueron excavadas posteriormente sobre varios grandes accidentes tectónicos del occidente venezolano (Tabla 1a). Aunque el

proceso inflacionario y devaluatorio ya se había abatido sobre la economía venezolana, los recursos financieros suministrados por la Industria Petrolera Venezolana, representada por varias de sus filiales, permitió proseguir con la excavación de trincheras ejecutadas por bulldozers (D-6 a D-8) y/o jumbos. Estas trincheras descomunales se

caracterizaban por remociones de material del orden de más de 2.000 m³ y ocasionalmente hasta los 5.000 m³, con dimensiones de: hasta unos 80 m de largo, 8 m de profundidad y ancho variable entre 8 a 4 m de tope a base respectivamente, con sección transversal trapezoidal para asegurar la estabilidad de las paredes (**Figura 7**). La utilización de este tipo de maquinaria introducía dos limitaciones logísticas: (a) buena viabilidad local (como mínimo engrazonada –tipo macadam-) para permitir la accesibilidad de la maquinaria al sitio seleccionado, la cual generalmente era desplazada por remolques cama-baja (“low-boys”); (b) las dimensiones del sitio a excavar debía permitir por una parte la maniobrabilidad de la maquinaria pesada y por otra la acumulación de los escombros removidos. Las paredes de estas excavaciones fueron todas lavadas con agua a presión. Igualmente, cuando requerido, fueron igualmente achicadas por motobombas, para lo cual el diseño de la excavación incluía una fosa de recolección. En 1986 y 1987 (**Tabla 1a**), se abrieron en orden

secuencial las trincheras de: (1)- Agua Viva (al norte del embalse de igual nombre, estado Trujillo; 9 en la **Figura 6**) sobre el segmento norte de orientación submeridiana de la falla de Valera (Funvisis, 1987a; Soulas, 1988; Soulas & Giraldo, 1994), (2)- Mene Grande (estado Zulia; 10 en la **Figura 6**) sobre la falla de Mene Grande (Funvisis, 1987a; Soulas, 1988; Soulas & Giraldo, 1994), (3)- La Grita (Hotel La Montaña, estado Táchira; 13 en la **Figura 6**) sobre la falla de Boconó (Funvisis, 1987b; Audemard & Soulas, 1995; Audemard, 1997), (4)- dos trincheras en Arapüey-Alguacil sobre el sistema frontal norandino (11 y 12 en la **Figura 6**), igualmente en Octubre 1986 (Funvisis, 1987b), (5)- Cordero (Fundo Mis Delirios, estado Táchira; (14 en la **Figura 6**) igualmente sobre la falla de Boconó pero en su segmento andino más meridional (Funvisis, 1987b; Audemard & Soulas, 1995; Audemard, 1997); y (6)- Buena Vista (San Miguel, estado Lara; 15 en la **Figura 6**) sobre la falla de Boconó en Marzo 1987 (Beltrán *et al.*, 1990).

EXCAVACIONES PALEOSÍSMICAS EN VENEZUELA EN EL SIGLO XX							
Año de excavación	Nombre de localidad excavada		Falla/Evidencia indirecta	Número de excavaciones/ estudio	Latitud (norte)	Longitud (oeste)	Referencia
1968	SINAMAICA		F. OCA	2	11°18'00"	71°48'07"	CLUFF & HANSEN (1969)
1980-1982	P B R O S E R C S D O A E	BS 1 LA LOMITA	F. CAPARO	1	7°44'22"	71°33'53"	FUNVISIS (1983)
		BS 3A RIDGE		1	7°44'10"	71°32'00"	
		BS 3B RIDGE		1	7°44'10"	71°32'10"	
		BS4 TUBERÍA		1	7°43'10"	71°33'33"	
		BS5 PRIMERA EMPEZADA		1	7°43'21"	71°33'17"	
		BS6 LA BLANQUITA		1	7°42'33"	71°36'11"	
	P V R U E S L A T L S A A	LV1 LA VUELTOSA	F. CAPARO	1	7°45'57"	71°28'00"	
		LV3 MEANDRO CAPARO		1	7°45'37"	71°28'45"	
		LV4 TERRAZA CAPARO		1	7°47'42"	71°25'30"	
		LV9 LADO GUAIMARAL		1	7°45'38"	71°28'30"	
		LV10 TERRAZA NORTE		1	7°49'06"	71°24'40"	
	P R E S A L A H O N D A	LH1 EL POTOSÍ	F. LAS LAPAS	1	7°57'40"	71°41'30"	
		LH4 TERRAZA URIBANTE	F. URIBANTE	1	7°55'48"	71°43'12"	
		LH5-LH9 REMOLINO		5	7°55'33"	71°44'20"	
P R E S A L A S C U E V A S	DO4 LA LAGUNITA	F. NORTE DORADAS	1	7°50'08"	71°43'43"		
	DO6 DORADAS	F. SUR DORADAS	1	7°47'53"	71°46'07"		
	DO7B TERRAZAS DORADAS	F. SUR DORADAS (PROLONG INEXIST.)	1	7°48'03"	71°46'11"		
1986	AGUA VIVA		F. VALERA	1	9°36'01"	70°36'25"	FUNVISIS (1987a), SOULAS & GIRALDO (1994)
	MENE GRANDE		F. MENE GRANDE	1	9°52'44"	70°54'14"	
	ARAPÜEY-ALGUACIL		F. PIEDEMONTE ANDINO NORTE	2	9°12'48"	70°58'35"	

Tabla 1a. Evaluaciones paleosísmicas realizadas en Venezuela en el siglo XX, indicando el accidente tectónico evaluado, el tipo de evidencia estudiado, las coordenadas geográficas aproximadas del sitio de estudio, el año de ejecución del estudio y las referencias más significativas.

1986	HOTEL LA MONTAÑA (LA GRITA)	F. BOCONÓ (BOC-A)	1	8°08'26"	71°56'21"	FUNVISIS (1987a), AUDEMARD & SOULAS (1995) Y AUDEMARD (1997a, 1998)
1987	MIS DELIRIOS (SABANA LARGA)	F. BOCONÓ (COLOVEN)	1	7° 52'40"	72°09'50"	
1987	BUENA VISTA	F. BOCONÓ (BOC-D)	1	9°53'02"	69°29'50"	BELTRÁN ET AL. (1990)
1989	PARAMO LA COLORADA	F. LA COLORADA-MACANILLA	1 TRINCHERA	7°55'37"	72°04'53"	FUNVISIS (1991a)
			y 4 CALICATAS	7°55'59"	72°04'48"	
1990	BOCA DE TOCUYO	LICUACIÓN SISMOS DE ABRIL-MAYO 1989	19 CALICATAS	11°21'28"	68°22'30"	AUDEMARD EL AL. (1990), DE SANTIS ET AL. (1990), AUDEMARD & DE SANTIS (1991), FUNVISIS (1991C)
1990	QDA EL MAMÓN	F. URUMACO	CORTE NATURAL QUEBRADA	11°12'54"	70°13'12"	FUNVISIS (1991b), AUDEMARD ET AL. (1999a)
1990	HATO LA PICA	F. ANCÓN	1	10°45'54"	71°09'47"	FUNVISIS (1991b), AUDEMARD(1993, 1996)
1991	HATO EL GUAYABAL	F. OCA	1	10°54'04"	70°58'44"	
1994	LAS TOSCANAS	F. EL PILAR	1	10°34'47"	63°21'34"	FUNVISIS (1994), BELTRÁN ET AL. (1996, 1999)
1997	MORRO DE LOS HOYOS	F. BOCONÓ (BOC-B)	1	8°48'05"	70°50'05"	AUDEMARD ET AL. (1999b)
1997	JOSE-LOTE 4	FALLA NORMAL POR PLEGAMIENTO	1	10° 03'39"	64° 51'46"	AUDEMARD (1997b)
1998	TERRANOVA	F. EL PILAR	TALUD VIVIENDA	10°28'56"	63°37'505"	AUDEMARD (1999, 2007, 2011)
	LAS MANOAS		1	10°29'31"	63°31'33"	
	CARRIZAL DE LA CRUZ		1	10°29'34"	63°29'48"	
	GUARAPICHE		1	10°30'46"	63°23'35"	

Tabla 1a (cont.). Evaluaciones paleosísmicas realizadas en Venezuela en el siglo XX, indicando el accidente tectónico evaluado, el tipo de evidencia estudiado, las coordenadas geográficas aproximadas del sitio de estudio, el año de ejecución del estudio y las referencias más significativas.



Figura 7. Excavación de trinchera Hato La Pica a través de la falla de Ancón, en las llanuras de Buchivacoa (estado Zulia oriental), con tractor D-8, de pala de 4 m de ancho, lo cual condicionaba excavaciones con dimensiones de: 80-90 m de largo, 8 m de profundidad y sección trapezoidal de 8 m de ancho al tope y 4 m a la base; y remociones de material de 2.500-3.000 m³. Apréciase en primer plano zona encalichada (blanquecina) que resalta la zona de falla.

La trinchera excavada a través de la falla de Boconó, en proximidad al Hotel La Montaña en Octubre 1986 (13 en la **Figura 6**), es de particular significado para el autor de la presente contribución. Fue su estreno en el campo de la paleosismología, y la misma presentó un sin número de complicaciones técnicas durante su excavación, entre las que merecen mención: (a)- mesa de agua relativamente superficial por excavarse una laguna de falla activa. Adicionalmente, el nivel freático se encontraba alto por realizarse el estudio al final del período lluvioso (noviembre); (b)- la ocurrencia de lluvias menudas pero de larga duración (superior a doce horas) inundaron la excavación, lo cual en ocasiones requirió de más de un día continuo de bombeo; (c)- el cambio contraproducente de condiciones climáticas condujo a cambiar de maquinaria: D6 de oruga a D6 de tejas, por la ineficiencia del primero en trabajar en condiciones pantanosas; (d)- el empeoramiento de las condiciones climáticas condujo a traer adicionalmente un jumbo para poder concluir la excavación por la imposibilidad del tractor pantanero (D6 de

tejas) de remover el material desde el fondo de la trinchera; (e)- la presencia de grandes bloques de origen coluvial provenientes de la ladera contigua a la laguna de falla requirió del concurso de un jumbo para su extracción y desalojo; (f)- la presencia de niveles arenosos no compactados en combinación con altos niveles de sobresaturación del suelo indujeron el colapso de las paredes de la trinchera; proceso que ocurrió luego de haber concluido el lavado de ambas paredes y requirió de la remoción del material colapsado por parte del jumbo; y (g) la necesidad de usar el jumbo desde el costado de la trinchera por estar la forma y profundidad de la excavación muy adelantadas, desestabilizó aún más las paredes a estudiar. Todos estos factores –que ocurrieron aún cuando se había previsto y excavado desde el inicio una fosa individual o calicata secundaria de unos 4,5 m de profundidad para abatir el nivel freático– conllevaron a retrogradar de una excavación que había superado los 5,5 m de profundidad a algo más de unos 3 m. No obstante la limitada exposición ofrecida por las paredes de la misma, deformaciones muy nítidas fueron reveladas dentro de una secuencia de sedimentos con excelente desarrollo de la estratificación; la cual pudo ser igualmente muy bien datada en vista de la cantidad de madera preservada por las arcillas anóxicas de la laguna de falla, bajo la forma de troncos de árboles y juncos en posición de vida (**Figura 8**). Aunque los resultados científicos de esta investigación paleosísmica han sido ampliamente discutidos y difundidos (referirse a Audemard & Soulas 1995; Audemard 1997; Audemard, 1998), la importancia de esta excavación reside en que se corrobora la asociación sismotectónica de dos grandes terremotos históricos andinos (el sismo de Mocotfés de 1610 y el Gran Terremoto de los Andes Venezolanos de 1894) con este segmento de la falla de Boconó; convirtiéndose en la primera en su estilo.

Simultáneamente al estudio realizado en La Grita sobre la falla de Boconó, dos trincheras eran excavadas por Soulas y Giraldo a fines del año 1986 (Funvisis, 1987a), en los escarpes de flexura del sistema frontal inverso norandino en el sector de Arapüey-Alguacil (11 y 12 en la **Figura 6**). Los resultados arrojados fueron previamente indicados.

Las complicaciones o dificultades técnicas presentes durante la excavación de la trinchera del Fundo Mis Delirios, en proximidad a Cordero (14 en la **Figura 6**), en el período seco siguiente

(Febrero 1987), fueron bien anticipadas como consecuencia de una buena comprensión de las condiciones topográficas y de los ambientes sedimentarios cuaternarios actuantes. La realización de un canal de desagüe alrededor de la excavación permitió abatir la mesa de agua que alimentaba la laguna de falla a ser estudiada y asegurar una trinchera esencialmente seca; esto aunado a haber decidido esperar el período seco para ejecutar la excavación. No obstante, la selección apropiada de la maquinaria (D8 de oruga y jumbo) permitió vencer los escollos que representaba el desnivel topográfico de 18 m existente entre el lomo de obturación y la laguna de falla contigua, así como los grandes bloques de roca que se esperaban encontrar dentro de los depósitos aluviales/torrenciales que conformaban el lomo de obturación. La remoción y reubicación de los escombros en esta trinchera con tal desnivel topográfico tuvieron que ser cuidadosamente planeados para poder asegurar el relleno de la excavación concluido el estudio paleosísmico, siguiendo solicitud expresa de los propietarios del Fundo Mis Delirios dedicado a la ganadería lechera. Los resultados paleosísmicos obtenidos en esta localidad han sido ampliamente discutidos por Audemard (1997). Todas estas excavaciones realizadas entre 1986 y 87 fueron financiadas por filiales de la Industria Petrolera Nacional – Intevep, S.A. y Maraven, S.A.-



Figura 8. Vista de la pared sureste de la trinchera La Grita (próxima al Hotel La Montaña, estado Táchira), que expone un pliegue en propagación de falla en los sedimentos lacustres suprayacentes a depósito coluvial de ladera fallado frágilmente, con visible componente en falla normal, ubicado en posición central al pie de la pared. Nótese el tronco de árbol aún en posición de vida, hacia el extremo inferior izquierdo de la fotografía. El autor posa de escala, con los pies “sembrados” en lodazal (Foto cortesía del Dr. Jean-Pierre Soulas).

En Marzo siguiente, otro equipo del Dpto. de Ciencias de la Tierra (Giraldo, Beltrán y Singer) emprende una nueva evaluación paleosísmica sobre la falla de Boconó, pero en su sector andino más septentrional (Cubiro-Barquisimeto; 15 en la **Figura 6**) a solicitud de la Alcaldía de Iribarren con fines de microzonificación sísmica de la ciudad de Barquisimeto; proyecto nunca concluido por carencia de recursos financieros del ente contratante. La dificultad técnica más resaltante de este estudio resultó ser el rellenado de la trinchera luego de concluido el estudio por su posición tan próxima a un talud empinado de la margen derecha del río Turbio, lo cual imposibilitaba la libre maniobrabilidad del tractor utilizado. Por otra parte, el bajo contenido de materia orgánica, así como de depósitos recientes en el sitio seleccionado –salvo una grieta de falla abierta ("*open crack*") con una secuencia estratigráfica de varios paleosuelos orgánicos sobrepuestos-, constituyeron una fuerte limitación en la interpretación de la actividad sísmica de la falla de Boconó en este sector, aunque confirmó su activación holocena. Es altamente probable que ello resulte de no haber cortado la traza principal de la falla sino una grieta R-T presente bajo la forma de un surco abierto y colmatado.

En 1989, en el marco del proyecto Sumandes II (Funvisis, 1991a; **Tabla 1a**), Singer y Beltrán excavan manualmente 5 trincheras de dimensiones pequeñas en la falla de La Colorada, en el Páramo de igual nombre y a unos 3.200 m de altitud (29 en la **Figura 6**). La necesidad de ejecutar las trincheras a pico y pala resulta de la inaccesibilidad del sector para maquinaria pesada. Los sitios seleccionados correspondían a lomos de obturación que represaban pequeñas lagunas de falla. Esta falla, según el estudio paleosísmico realizado, produjo 4 eventos de magnitud moderada (Ms 6,2-6,3) en los últimos 5.000 años, pudiendo el más reciente corresponder al sismo de 1919 (Funvisis, 1991a).

A consecuencia de dos eventos de magnitud moderada, el proceso de licuación de suelos ocurre en forma intensiva y extensiva en las llanuras deltaico-costeras de Falcón oriental en Abril-Mayo de 1989 (5 en la **Figura 6**). Teniendo el Intevep, S.A. interés en conocer las características de este proceso asociado a fenómenos de inestabilidad de masas en zonas de muy baja pendiente ("lateral spread" o desprendimiento lateral) con miras a evaluar eventuales escenarios sísmicos similares que

afectasen la seguridad e integridad física de los diques costaneros de la Costa Oriental del Lago de Maracaibo (C.O.L.M.), se aplica técnicas paleosísmicas a través de los remanentes superficiales pobremente preservados de licuación (volcanes de arena y grietas de ventilación siendo suavizados por las lluvias) aún identificables en la población de Boca de Tocuyo y Tocuyo de la Costa a fines de 1989 e inicios de 1990. Son excavadas 19 calicatas de aproximadamente 1 m² en planta y 0,75 m de profundidad, estando esta última condicionada por el nivel freático (**Tabla 1a**). Los resultados de este estudio fueron extensamente discutidos y publicados por De Santis (1990) y Audemard & De Santis (1991). A título anecdótico y de manera coincidente, esta técnica de investigación paleosísmica en rasgos de licuación producidos durante sismos contemporáneos en territorio venezolano es aplicada por primera vez a nivel mundial y simultáneamente con colegas norteamericanos que lo ensayaron en la licuación asociada al sismo de Saguenay – Canada- de Noviembre de 1988 (Tuttle *et al.*, 1990). A diferencia de todos los estudios paleosísmicos previos, éste no se concentró sobre evidencias directas (fallas geológicas con expresión superficial) y tampoco sobre la identificación de paleosismos, sino de fenómenos de licuación en asociación a sismos instrumentales contemporáneos.

En el período seco entre fines del año 1990 e inicios de 1991, dos trincheras son excavadas sobre las trazas individuales de las fallas de Ancón (Hato La Pica, estado Zulia; 3 en la **Figura 6**) y Oca (Hato el Guayabal, estado Falcón; 2 en la **Figura 6**), en las llanuras de Buchivacoa, al este de la bahía de El Tablazo, en el marco del Proyecto **SU**ministro **FAL**cón-Zulia –**SUFAZ**-, contratado entre Maraven, S.A. y Funvisis y coordinado por Audemard en compañía de Rodríguez, Chacín, Adrianza y un cooperante español en entrenamiento, Dr. Antonio Casas-Sainz (**Tabla 1a**). En este mismo proyecto, igualmente se evalúa la falla de Urumaco desde el punto de vista paleosísmico, usando un afloramiento natural excavado por un afluente del río Urumaco (**Figura 3**; 4 en la **Figura 6**). Los resultados de estas evaluaciones han sido ampliamente discutidos y publicados (Funvisis, 1991b; Audemard, 1993, 1996; Audemard *et al.*, 1995, 1999a).

A inicios de 1994 y en el marco de un proyecto financiado por Intevep, S.A., FUNVISIS –bajo la conducción de Beltrán y en la compañía de los

Ing. Rodríguez y Rivero- excava la primera trinchera en el oriente del país, sobre la falla de El Pilar, en la localidad de Las Toscanas y a unas pocas decenas de metros al norte del río Casanay, entre las poblaciones de Guarapiche y Río Casanay, estado Sucre (**Tabla 1a**; 33 en la **Figura 6**). Ésta será la última excavación ejecutada con un tractor; y por ende con dimensiones del orden de 80-90 m de largo, 8 m de ancho máximo en el tope y profundidad superior a los 5 m. En la misma se determinó que dicha traza de la falla de El Pilar presenta una recurrencia del orden de 900 a 1.200 años para sismos de magnitud superior a 7 (Funvisis, 1994; Beltrán *et al.*, 1996; Beltrán *et al.*, 1999). La limitación más importante en cuanto a los resultados arrojados es que la falla presenta por lo menos tres trazas activas subparalelas en el sector seleccionado para la evaluación paleosísmica, lo cual asegura la ocurrencia de deformación distribuida, implicando que sólo se está cuantificando parte de la deformación activa. Para remediar tal situación, se requiere ejecutar-evaluar al menos una trinchera por cada traza activa identificada; en este caso restarían 2 otras por ser ejecutadas y analizadas.

A solicitud del proyecto internacional PILOTO y con financiamiento de la Unión Europea, FUNVISIS –en la persona de Audemard- es comisionada para ejecutar la cuarta trinchera sobre la falla de Boconó, con fines de realizar un taller de entrenamiento en paleosismología para colegas latinoamericanos (*South American Workshop On Paleoseismology –SAWOP-*; para más detalles, referirse a *página web*: <http://home.hiroshima-u.ac.jp/kojiok/QR/sawop.htm>; también a Laffaille *et al.*, 1998). Luego de una campaña de campo para pre-seleccionar varios sitios potenciales de trinchera en el sector del Páramo de Mucubají (Santo Domingo-San Rafael de Mucuchíes; Audemard & Bellier, 1997), donde dicha falla presenta excelentes rasgos geomórficos de fallamiento activo, se decidió conservar dos sitios: (1)- cerca de Apartaderos, en Morro de Los Hoyos, el cual fue finalmente excavado y estudiado (16 en la **Figura 6**); y (2)- cerca del Hotel Los Frailes, que aún está pendiente su estudio. El taller tuvo lugar en febrero de 1997 y como consecuencia de la excelente calidad de los datos obtenidos, esta experiencia resultó en una publicación científica de todos los participantes al taller (Audemard *et al.*, 1999b). El tamaño de la excavación fue sustancialmente reducido con respecto a estudios anteriores similares por encontrarnos dentro de un área protegida del Parque Nacional Sierra Nevada y sólo modificable

con fines agropecuarios por los comuneros de Apartaderos. Esta trinchera fue abierta por un jumbo en algo menos de un día, alcanzando dimensiones de unos 20 m de largo, 3 m de ancho máximo (antes de parcialmente colapsar un sector de la misma cortado a expensas de una turbera activa) y unos 3 m de profundidad (remoción total de unos 200 m³ aproximadamente). No obstante, merece mención que el escollo más difícil de vencer fue la capacidad negociadora del propietario de la Finca El Amparo, quien aún no daba su brazo a torcer para cuando los participantes internacionales estaban ya subiendo al páramo desde Barinitas por autobús. La obtención del permiso costó una sustancial dieta en efectivo, así como el acondicionar la excavación en “ojo de agua” (reservorio) a la conclusión del estudio.

Como consecuencia del sismo de Cariaco del 09 de julio de 1997, PDVSA aporta los medios financieros para realizar investigaciones referentes al evento telúrico. FUNVISIS, bajo la coordinación de Audemard, ejecuta y estudia tres excavaciones paleosísmicas sobre la ruptura de dicho sismo en marzo-abril 1998 para evaluar la historia sísmica de dicho segmento de la falla El Pilar (**Tabla 1a**; 34, 35 y 36 en la **Figura 6**). En vista del espacio físico reducido de los tres sitios seleccionados –correspondientes a los traspacios de tres viviendas localizadas en Las Manoas, Carrizal de la Cruz (**Figura 2**) y Guarapiche-, las excavaciones realizadas con jumbo fueron modestas en sus dimensiones (unos 20 m de largo, 3 de ancho y 3 de profundidad). No presentaron problemas de estabilidad de sus paredes aunque fueron lavadas con agua a presión. Un cuarto afloramiento –correspondiente a un corte antiguo hecho para la construcción de una vivienda en Terranova y ubicado por el Ing. Acosta- fue igualmente utilizado como apoyo a las excavaciones ejecutadas (37 en la **Figura 6**). Los resultados científicos derivados de este estudio fueron publicados por Audemard (1999b, 2011). Particular mención requiere la trinchera de Las Manoas (34 en la **Figura 6**). Esta única excavación paleosísmica es probablemente record mundial dado que expone, además de las evidencias del sismo de Cariaco de 1997 en sus paredes, 15 coluviones cosísmicos interdigitados (“colluvial wedge”) que identifican igual número de eventos en los últimos 5.000-6.000 años, en una pared de apenas 2 m de alto (Audemard, 2011). Es decir, identifica 16 eventos de magnitud próxima a 7,0 con un retorno promedio de 350 años, en los últimos 5.600 años. En tiempos más

recientes, Rockwell *et al.* (2015) identifica un número superior de sismos, de hecho 21 eventos sobre la falla de San Jacinto, en California, en la localidad de Hog Lake, en una ventana temporal más corta, de 4000 años, con un periodo de retorno de 185 ± 105 a. No obstante, esta cronología de eventos está construida a partir de una serie de 5 trincheras paleosísmicas transversas, que alcanzan una profundidad cercana a 9 m; y no de un registro continuo en una única excavación. Debemos resaltar que el único factor desfavorable en este tipo de estudios por multi-trincheras es el elevado costo invertido en dataciones radiocarbónicas, más allá del propio costo de las excavaciones. En el caso venezolano, en tres excavaciones, se dataron 82 muestras, y 111 en el californiano.

En el presente siglo XXI

El cambio de siglo, así como de corriente política en el país, traerán cambios sustanciales sobre la forma de financiar la ciencia y la investigación en Venezuela, lo cual repercutirá en la ejecución de las futuras excavaciones paleosísmicas. A excepción de una excavación paleosísmica ejecutada sobre la falla El Ávila con fondos de un proyecto ferroviario (tren Caracas-Guaremas y Guatire, aun en construcción) financiado por la empresa brasilera Odebrecht y del estudio de un doble afloramiento antrópico existente, en el área de proyecto del Núcleo de Desarrollo Endógeno Urimare (Catia La Mar, edo. Vargas; nunca acometido), los fondos para sufragar los estudios paleosísmicos en el siglo en curso serán casi exclusivamente adelantados por el Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología –FONACIT-, ente adscrito al Ministerio de Ciencia y Tecnología (y todas sus variaciones de nombre recibidas en unos 20 años), creado a fines de siglo pasado al aglutinar los centros y fundaciones de investigación existentes en el país para el momento; entre ellos, la Fundación para la cual ha laborado el autor de esta contribución por casi 34 años (FUNVISIS).

Durante el tiempo que le tomó al nuevo gobierno organizarse, Audemard aprovechó para excavar dos trincheras de exploración paleosísmica en Colombia en los años 2001 y 2002: -A) la primera en el área epicentral del destructivo sismo de Armenia del 25 de enero de 1999; en la hacienda El Paraíso, próxima a Circasia, sobre la falla de Armenia, con el auspicio y organización de la Universidad de Quindío, bajo la coordinación del Dr. Armando Espinosa Baquero, estando la publicación de los resultados aún pendiente. Y -B)

En Los Gomos, Tucuní, a través de la falla de Ibagué, financiada y organizada por el INGEOMINAS (actualmente Servicio Geológico Colombiano –SGC-), bajo la coordinación de Jairo Alonso Osorio. Este estudio dio cabida a una excelente publicación por parte de INGEOMINAS (Osorio *et al.*, 2008). Amerita mención que estos dos estudios fueron realizados como talleres de formación para colegas colombianos, con la participación de entre unos 10 a 15 profesionales en cada una (**Figura 9**).



Figura 9. Vista general de la trinchera de Los Gomos (al este de Ibagué, departamento del Tolima), a través de la falla dextral de Ibagué. Se aprecia al grupo de participantes al Curso-Taller en Paleosismología, realizando el levantamiento de las paredes reticuladas (1 m x 1 m) de las paredes de la excavación. Aspecto típico de trinchera excavada por retro-excavadora (“jumbo”) de pala de 1 m de ancho.

Enmarcado en la convocatoria de la Agenda “Gestión de Riesgo y Manejo de Desastres” del FONACIT, el autor introduce un proyecto para sistemáticamente excavar los distintos segmentos en que la falla de Boconó había sido subdividida para el momento (Audemard *et al.*, 2000). El proyecto FONACIT 2001002492 de dicha agenda, de tres años de financiación y con liberación de los fondos del primer año de ejecución en el año 2003, acometerá, por una parte, la excavación de 7 nuevas trincheras de evaluación paleosísmica a lo largo de la falla de Boconó (Audemard, 2008; **Tabla 1b**), sumadas a las 4 ya existentes (La Grita, Fundo Mis Delirios, Buena Vista y Morro de Los Hoyos, ejecutadas entre 1986 y 1997; **Tabla 1a**): -A) En 2004, una en el segmento Boc-c, en la localidad de la Mesa del Caballo (17 en la **Figura 6**), la cual le dará su nombre, ubicada levemente al oeste de la laguna de Mucubají (Audemard, 2008), cuyos resultados están ampliamente discutidos en Audemard *et al.*

(2008). Esta trinchera, complemento de la de Morro de Los Hoyos (16 en la **Figura 6**) ejecutada sobre el segmento Boc-b, permite determinar que la falla de Boconó en su conjunto se mueve en el orden de 10 mm/a, y que los segmentos Boc-b y Boc-c, en el relevo transtensivo de Apartaderos, se mueven simultáneamente cada 1350-1500 años, mientras que Boc-c (más rápido) recurre 2 veces más, cada 450-500 años, intercalados entre los de mayor período de retorno. **-B**) En 2005, 2 en el segmento Boc-d, al SO de la ciudad de Barquisimeto, entre Sabana Grande y Sanare, denominadas La Primavera y Mis Delirios (o Manzano; Bueno *et al.*, 2005a y b; Audemard, 2008; Audemard, 2014; 18 y 19, respectivamente, en la **Figura 6**). La trinchera de Mis Delirios, con un nombre que no podía ser más apropiado, cuyo estudio terminó siendo muy complicado de concluir por una intensa lluvia que anegó la excavación, dificultando el acceso y el movimiento dentro de la excavación. **-C**) Igualmente en 2005, se ejecutan y estudian 2 otras (Yaritagua y Quigua; 20 y 21 respectivamente, en la **Figura 6**) en el segmento Boc-e, entre Barquisimeto y San Felipe (Bueno *et al.*, 2005a y b; Audemard, 2008; Bueno, 2009; Audemard, 2014; 2016). Terminará siendo el resultado más significativo el hecho que la trinchera de Yaritagua (**Figura 10**) confirmará por vía geológica que el gran terremoto del 26 de marzo de 1812 que destruye San Felipe y Caracas, rompe seguro a lo largo del pie de la sierra de Aroa, en el valle del Yaracuy, a lo largo del segmento Boc-e (Audemard, 2016), en asociación a uno de los 2 focos sísmicos del sismo de Caracas de 1812 (Choy *et al.*, 2010). El estudio de estas 4 excavaciones conformaba el núcleo de la tesis de maestría UCV de la Ing. Mary Luz Bueno Arcia, que nunca fue defendida. Y **-D**) En 2006, en el relevo entre los segmentos Boc-a y Boc-b, en la cuenca en tracción de Lagunillas, se ejecutan 2 excavaciones, una por traza de falla, denominadas Pantaleta y Quinanoque respectivamente (22 y 23 en la **Figura 6**). Este estudio constituyó el cuerpo medular de la tesis de maestría del Ing. Geol. Miguel Alvarado de la ULA (Alvarado *et al.*, 2007, 2008, 2009; Alvarado, 2008). La trinchera de la Pantaleta sobre Boc-a (22 en la **Figura 6**) confirmará la ocurrencia de los sismos de 1610 y 1894, trayendo reafirmación a los resultados de Audemard (1996, 1998; **Figura 11**), al igual que la trinchera de Quinanoque (23 en la **Figura 6**) traerá evidencia adicional de que la secuencia de 1673-1674 ocurre, al menos de manera parcial, a lo largo de Boc-b (Alvarado, 2008). Cabe destacar que todas

las 7 trincheras de este proyecto fueron excavadas a mano, lo cual redujo considerablemente su tamaño, así como su costo de ejecución, impacto ambiental y esfuerzo en la fase de rellenado y estudio. Sus dimensiones últimas no superaban los 15 m de largo, unos 3 m de profundidad y de 2 a 3 m de ancho, con tendencia a sección trapezoidal con base angosta, a fines de asegurar la estabilidad de las paredes de la excavación (**Figs. 10 y 11**). La única de estas excavaciones que no podía ser de otra manera o tamaño, era la trinchera de Mesa del Caballo por encontrarse dentro de los linderos del Parque Nacional Sierra Nevada (**Figura 12**).



Figura 10. Excavación realizada a mano, por limitaciones de espacio, rugosidad de la topografía y vocación agrícola del terreno, de la trinchera de Yaritagua, a través del segmento Boc-e de la falla de Boconó.



Figura 11. Trinchera La Pantaleta, igualmente excavada a mano, por limitaciones de espacio e imposibilidad de acceso de maquinaria pesada, a través del segmento Boc-a de la falla de Boconó. Grupo intercambia observaciones, opiniones e interpretaciones sobre la estratigrafía expuesta por la excavación. En el centro del grupo, se ubican los profesores y colegas Jaime Laffaille (†) y Carlos Ferrer Oropeza (†).

EXCAVACIONES PALEOSÍSMICAS EN VENEZUELA EN EL SIGLO XXI						
Año de excavación	Nombre de localidad excavada	Falla/Evidencia indirecta	Número de excavaciones/ estudio	Latitud (norte)	Longitud (oeste)	Referencia
2002	LAGUNA DE MUCUBAJÍ	HOMOGENITAS/ DEFORMACIONES SEDIMENTOS BLANDOS	4 NÚCLEOS	8°48'00"	70°49'30"	AUDEMARD ET AL. (2002, 2003), BECK ET AL. (2003), CARRILLO ET AL. (2002, 2003), CARRILLO (2006) Y CARRILLO ET AL. (2006, 2008)
	PALEO-LAGO DE LOS ZERPA		CANALETAS; 7 CORTES NATURALES	8°48'30"	70°47'10"	
2002	PÁRAMO DE MUCUBAJÍ	DEFORMACIONES GRAVITATORIAS PROFUNDAS EN LADERAS	TALUD NATURAL DE RIO	8°49'00"	70°47'00"	AUDEMARD ET AL. (2002, 2008, 2010, 2011)
	CERRO LA CAMACHA		NO APLICA	8°55'00"	70°35'00"	
2004	MESA DEL CABALLO	F. BOCONÓ (BOC-C)	1	8°47'13"	70°50'37"	AUDEMARD (2008; 2014), AUDEMARD ET AL. (2008)
2005	LA PRIMAVERA	F. BOCONÓ (BOC-D)	1	9°38'19"	69°46'19"	BUENO ET AL. (2005a, 2005b), AUDEMARD (2008, 2014)
	LOS MANZANOS		1	9°38'36"	69°44'47"	
	YARITAGUA (EL SALTO)	F. BOCONÓ (BOC-E)	1	10°06'12"	69°05'48"	OLLARVES ET AL. (2005), AUDEMARD (2008, 2014, 2016), BUENO (2009)
	QUIGUA		1	10°17'55"	68°51'18"	
2006	LA PANTALETA	F. BOCONÓ (BOC-A)	1	8°30'44"	71°23'07"	ALVARADO (2008), AUDEMARD (2008), ALVARADO ET AL. (2007, 2008, 2009), AUDEMARD (2014)
	QUINANOQUE	F. BOCONÓ (BOC-B)	1	8°30'01"	71°24'52"	
2007	SAN ANTONIO DE MUCUÑO	F. BOCONÓ (BOC-A-BOC-B) ARQUEO-SISMOLOGÍA	ABANDONO DEL PUEBLO DE DOCTRINA	8°26'00"	71°13'00"	LAFFAILLE ET AL. (2008, 2010)
2007	ARAPUEY	F. PIEDEMONTE ANDINO NORTE	2	9°15'47"	70°55'58"	ARANGUREN (COM. PER., 2014)
2007-2008	ZONA INDUSTRIAL DE VALENCIA FLOR AMARILLO	F. LA VICTORIA (SEGMENTO LA CABRERA)	2	10°09'39"	67°55'41"	ACOSTA (2009)
				10°09'35"	67°57'52"	
2008-2009	SANTA ROSA (UNIVERSIDAD METROPOLITANA)	F. EL ÁVILA	1	10°30'03"	66°46'42"	RODRÍGUEZ ET AL. (2011, 2016)
2009	GOLFO DE CARIACO	F. EL PILAR	19 NÚCLEOS			AGUILAR (2016), AGUILAR ET AL. (2013, 2015a y b, 2016, 2017)
2009	BOCA DE TOCUYO	LICUACIÓN SISMO 12 SEPTIEMBRE 2009	6 CALICATAS (3 ESTUDIADAS)	11°20'46"	68°20'31"	RODRIGUEZ ET AL. (2009)
2012	PARAIZO	F. BOCONÓ (COLOVEN)	1	7°48'40"	72°20'30"	RODRÍGUEZ & AUDEMARD (2012, 2013), RODRÍGUEZ (2017)
	EL ZUMBADOR		1	7°58'32"	72°05'17"	
2012	URIMARE	F. SAN SEBASTIÁN	2 AFLORAMIENTOS	10° 36' 17"	67° 01' 09"	RODRÍGUEZ ET AL. (2012)
2015	HIGUERÓN (LA MATA)	F. BOCONÓ (BOC-E)	1	10°16'24"	68°52'56"	POUSSE (2016), POUSSE ET AL. (2018)
	SAN RAMÓN		2	10°12'47"	68°56'00"	

Tabla 1b. Evaluaciones paleosísmicas realizadas en Venezuela, en el siglo XXI, indicando el accidente tectónico evaluado, el tipo de evidencia estudiado, las coordenadas geográficas aproximadas del sitio de estudio, el año de ejecución del estudio y las referencias más significativas.

De los 7 estudios por trincheras realizados en el marco de este proyecto FONACIT 2001002492, combinados a los 4 previamente existentes, para totalizar 11 a ese momento, Audemard (2008,

2009, 2010, 2014) concluye que: 1) La segmentación propuesta por Audemard *et al.* (2000), con base en criterios geométricos, se ve confirmada por las evaluaciones paleosísmicas. 2)

Del último ciclo sísmico, pareciese que las roturas progresan de un segmento al contiguo desde el SO hacia el NE. y 3) Si el sismo de 1894 fuese la repetición de 1610 así como la iniciación de un nuevo ciclo sísmico, deberíamos esperar que el próximo gran terremoto producto de la falla de Boconó ocurra sobre el segmento Boc-b antes de fin del siglo XXI en curso, lo cual afectaría al más gran centro poblado de la región andina, la ciudad de Mérida, la cual tiene un largo historial de destrucciones sísmicas y reconstrucciones. De este estudio igualmente se destila de manera implícita, que un nuevo segmento de la falla de Boconó debería definirse al nivel de la frontera colombo-venezolana, lo cual hará la Ing. Luz Rodríguez en su tesis doctoral defendida exitosamente en el año 2018 (Rodríguez & Audemard, 2012; 2013; Rodríguez, 2017). Esta profesional definirá el nuevo segmento COLOVEN de la falla Boconó al nivel de la frontera, como acrónimo de segmento COLOmbo-VEnezolano (Rodríguez, 2017).



Figura 12. Vista general de la trinchera Mesa del Caballo, en localidad homónima (estado Mérida), a través del segmento Boc-c de la falla de Boconó. Corresponde a la excavación más angosta y corta, excavada por el autor, por encontrarse en un Parque Nacional, atendiendo la premisa de mínima intervención del espacio natural.

Por otra parte, y en paralelo, el proyecto FONACIT 2001002492 también se interesará en

el estudio de evidencias indirectas. A título de paréntesis, debemos indicar que con el apoyo de la Embajada de Francia, la cual contribuyó financiando un intenso tour de visitas del autor a 6 instituciones científicas o académicas francesas en el año 1999, para promover y entablar cooperaciones científicas en temas de interés común, y en particular para desarrollar técnicas ajenas a FUNVISIS hasta el momento, el Laboratorio de Geodinámica de las Cadenas Alpinas (LGCA por sus siglas en francés; hoy día renombrado ISTerre, Chambéry, Departamento de la Saboya) mostró interés en cooperar. Cooperación que se concretaría por intermedio de dos proyectos internacionales enmarcados en el programa FONACIT-ECOS Nord (PI-2003000090 entre 2004 y 2007 y PI-2009000818 entre 2010 y 2013) co-liderados por Beck y Audemard por cada país, aunque los fondos para apoyar las investigaciones propiamente, sobre al menos 16 años (2000-2015), provendrán de múltiples proyectos de FUNVISIS financiados por FONACIT igualmente, con fondos franceses ocasionalmente. En un primer momento, los fondos los aportará FONACIT-2001002492 – Agenda Gestión de Riesgos y Manejo de Desastres-, y en lo sucesivo, FONACIT-2012002202 (Geociencia Integral de los Andes de Mérida –GIAME-) y finalmente FONACIT-2013000361 (TSUNAMI). Cerrado el paréntesis, las deformaciones cosísmicas en las secuencias lacustres de la laguna de Mucubají y el paleo-lago de Los Zerpa serán estudiadas en diversas misiones de campo ejecutadas entre 2001 y 2002. La laguna de Mucubají (28 en la **Figura 6**) se estudiará por intermedio de la recuperación de 4 núcleos continuos de varios metros de longitud (hasta un máximo de 8,4 m), con un tomador de núcleos, importado de manera temporal a tal fin y perteneciente al LGCA (**Figura 13**), mientras que el paleo-lago de Los Zerpa, hoy seco por rotura o incisión de la morrena contenedora, se estudiará de forma más convencional al levantar afloramientos expuestos (al menos 7), de los cuales algunos sus secuencias se muestrearán por intermedio de canaletas (“U channels”; **Figura 14**). La esencia de este trabajo dio cabida a la realización de la tesis doctoral del Ing. Eduardo Carrillo, defendida exitosamente en diciembre de 2006. Son numerosos los trabajos publicados sobre esta temática (Audemard *et al.*, 2002, 2003; Carrillo *et al.*, 2002, 2003; Beck *et al.*, 2003; Carrillo, 2006; Carrillo *et al.*, 2007, 2008, entre otros). De manera muy general y sucinta, podemos decir que los sismos registrados en las trincheras de Morro de los Hoyos (Boc-b;

Audemard *et al.*, 1999; 16 en la **Figura 6**) y Mesa del Caballo (Boc-c; Audemard *et al.*, 2004; 17 en la **Figura 6** y ver **Figura 12**), de magnitudes estimadas en el orden de al menos Mw 7,0, indujeron deformaciones en sedimentos blandos y remobilizaciones de los sedimentos lagunares de fondo, observadas en los núcleos y canaletas recolectadas como en los afloramientos estudiados. De igual manera, podemos aseverar que las lagunas de sedimentación primordialmente detrítica son registradores de deformaciones sedimentarias más sensibles que las trincheras porque observaron más sismos que los determinados por trincheras, lo cual puede interpretarse como que perciben y registran sismos de magnitud inferior a Mw 7,0 y/o registran sismos de fuentes más distantes y distintas que la falla cercana de Boconó.



Figura 13. Toma de núcleos largos (segmentos del al menos 3 m de largo c/u) continuos del fondo de la laguna de Mucubají (estado Mérida), en proximidad a los segmentos Boc-b y Boc-c de la falla de Boconó.

Igualmente enmarcadas en el proyecto FONACIT 2001002492, dos otras investigaciones fueron desarrolladas vinculadas al estudio de la cronología de los sismos del pasado. A conocimiento del autor, el primer estudio en el área de la **arqueosismología** en territorio venezolano tiene lugar, disciplina que se encuentra a caballo entre la sismología histórica y la paleosismología (**Figura 1**), cuyo objetivo es determinar la historia de los sismos a partir del estudio de la destrucción por parte de los sismos, del medio construido por el hombre; disciplina con mucho auge en los países con larga tradición cultural y arquitectónica, asentados particularmente en el entorno del mar Mediterráneo y particularmente en países como Grecia, Italia, y aquellos que conforman el Medio Oriente. Laffaille y colaboradores, por medio de un

análisis documental, de fotografías aéreas y visitas de campo, concluyen que el abandono de San Antonio de Mucuñó, en proximidad a la actual población de Acequias (ubicada al SO de la ciudad de Mérida), la cual sería primero parcialmente reconstruida al lado de su primer asentamiento y luego totalmente abandonada, ocurre a consecuencia de los daños sufridos por deslizamientos inducidos por el sismo de 1674 DC, que fundamentalmente afectaría al sistema de riego o acequias con que contaba este pueblo de doctrina (Laffaille *et al.*, 2008; 2010). Por su parte, la otra investigación versará en reconocer, caracterizar y cartografiar gigantescos deslizamientos (*sackungen*) que afectan las faldas noroeste de la Sierra Nevada de Mérida (particularmente el Páramo de Mucubají) y el cerro La Camacha, en las vertientes sureste de los valles de los ríos Santo Domingo y Aracay, en el estado Mérida, vinculando su puesta en movimiento con la actividad de la falla de Boconó (Audemard *et al.*, 2002; 2008; 2010; 2011a). Estos deslizamientos son superiores a los 10 km de longitud y pueden alcanzar varias centenas de metros de espesor, aunque su peligrosidad parece bien baja porque se presagia que sus movimientos sean lentos y episódicos.



Figura 14. Toma de muestras continuas de afloramientos de la secuencia lacustre del paleo-lago Los Zerpa (morrena Los Zerpa, estado Mérida), por parte del Dr. Christian Beck, afectada por la falla de Boconó.

Para 2007-2008 (**Tabla 1b**), se realizan en la región central del país los primeros estudios paleosísmicos, a pesar que 25 años antes ya se habían iniciado diversos esfuerzos de cartografía neotectónica y búsqueda de sitios potencialmente interesantes para ejecutar evaluaciones paleosísmicas, pero sin éxito (e.g., Audemard, 1984; 1985; Schubert, 1986; 1988; Audemard *et al.*, 1988). Ya hemos mencionado previamente los estudios realizados por Acosta (2009) para la empresa Coral 83 Consultores, entre finales del 2007 y comienzos del 2008, quien ejecuta dos trincheras exploratorias al suroeste del lago de Valencia, buscando identificar sí las deformaciones superficiales observadas en la Zona Industrial de Valencia, sector Flor Amarillo (estado Carabobo; 31 en la **Figura 6**), guardaban relación alguna con el sistema de fallas La Victoria. Por su parte, FUNVISIS, en el marco de un contrato de servicio con la empresa brasilera Odebrecht (Funvisis-Odebrecht N°CON-LCGG-021-2007), para el estudio del trazado y construcción de obras del tren Caracas-Guarenas/Guatire, bajo la coordinación de la compañera Luz María Rodríguez, excava entre fines del 2008 e inicios del 2009, una trinchera a través de la falla El Ávila, en el sector Santa Rosa (al NE del campo universitario de la Universidad Metropolitana, urb. Terrazas del Ávila, Caracas; 30 en la **Figura 6**), estando los principales resultados disponibles en Rodríguez *et al.* (2011; 2016). De manera muy general, este estudio confirma y acota mejor las estimaciones de peligrosidad sísmica (sismo Mw 6,9 cada 3200-3500 a, con tasa de movimiento de 0,3 mm/a) que se habían hecho para esta falla con base en su cartografía neotectónica (sismo Ms 6,8 cada ≥ 2300 a), así como su tasa de desplazamiento ($\leq 0,4$ mm/a; Audemard *et al.*, 2000). En ese año 2009, a consecuencia del sismo del 12 de septiembre, la costa nor-oriental del estado Falcón se ve afectada de nuevo por licuación de suelos (6 en la **Figura 6**), y FUNVISIS, por intermedio de un equipo de trabajo liderado por la Ing. Rodríguez, replica el estudio de las evidencias de licuación por intermedio de calicatas efectuado en la misma región de afectación casi 20 años antes por los sismos de Boca de Tocuyo de 1989 (Rodríguez *et al.*, 2009; **Tabla 1b**). Por último y un poco más tarde, en el año 2012, se estudian dos afloramientos antrópicos contiguos, separados por unos escasos 80 m, cuyas características geológicas resultaron ser muy distintas, lo cual hizo sospechar a Rodríguez *et al.* (2012) que la traza activa de la falla de San Sebastián, en el área prevista para la construcción del Núcleo de

Desarrollo Endógeno Urimare y dentro de los linderos de una antigua e inactiva planta de combustible de PDVSA (Catia la Mar, edo. Vargas; 32 en la **Figura 6**), podría estar ubicada un poco más al sur de los afloramientos estudiados, y que las deformaciones observadas eran el resultado indirecto del movimiento de la traza principal, no visibles hoy en superficie, a consecuencia de las modificaciones topográficas ejecutadas a fines de los años 50. Esta interpretación preliminar fue corroborada con el resultado de las dataciones radiocarbónicas, confirmando así la actividad holocena de dicha falla. Efectivamente, la traza activa de la falla de San Sebastián coincide y se alinea en dirección este-oeste más al sur de los referidos afloramientos de Urimare, de acuerdo a un trazado de una longitud de 7 km, controlado por los desvíos respectivos de la qda. Tacagua hacia el oeste hacia Catia la Mar y de la qda. Las Pailas al torcer hacia el este para llegar al mar y por un "scarplet" blanquecino que se evidencia con claridad en las vistas de la Misión aerofotográfica C8 anteriores. En ocasión de la evaluación de la amenaza sísmica para las obras planeadas del monorriel Caracas-La Guaira, Funvisis propuso a FERROCAR el 9-06-1982 y en el marco del Contrato 281, la ejecución de dos trincheras de exploración paleosísmica de 30 metros de longitud y del orden de 500 metros cúbicos c/u sobre la presunta prolongación fotogeológica de la traza activa de la falla de San Sebastián. Aquellos sitios de trinchera fueron ubicados en el margen derecho del desvío natural de la qda. Tacagua hacia el oeste y al SE de los afloramientos de Urimare en la planicie aluvial de origen geológicamente reciente, con motivo de la planeación cercana de la Estación del General Páez del referido ferrocarril, propuesta de proyecto y obra que no llegaron a concretarse. En aquella oportunidad además, Funvisis (1984) efectuó reconocimientos geológicos de campo de la falla de San Sebastián en ambas extremidades del actual aeropuerto de Maiquetía, que arrojaron evidencias de deformaciones por falla en el Pleistoceno rojizo en la terminación oeste de las pistas en la cercanía del centro de elaboración de comidas para pasajeros, y que permitieron evidenciar la propia traza activa de la falla al este de las pistas, en un ancho mínimo de ocho metros en el lecho de la qda. Las Pailas correspondiente al tramo dirigido hacia el mar, y donde estaba aquella señalada por afloramientos gris-oscuro de "gouge" y de ripios profusamente cizallados. En el intervalo entre las dos extremidades de Las pistas, el geólogo Gibson-Smith (1974) ubicó en octubre de 1972 la posición geológica de la traza

cuaternaria de la falla en una mega-trinchera artificial de 800 metros de longitud por 20 metros de ancho y 12 metros de profundidad excavada para fines de reubicación y embaulamiento del trazado norte-sur de la qda. Las Pailas a través de las pistas y a una distancia de 650 metros más al oeste del trazado anterior. En el perfil G-G' del corte N-S correspondiente a esta excavación y acotado en un mapa previo de Weisbord (1957) en el sitio de cruce del perfil con la traza E-O de la qda. Las Bruscas alineada sobre la traza de falla, el referido accidente estructural aflora en un ancho de 10 metros evidenciado por "gouges" verticales y rodados de origen conglomerático cizallados, que ponen en contacto tectónico a la Formación Las Pailas al Norte con los depósitos aluviales marrón oscuro de la referida qda. Las Bruscas al Sur. Los trabajos de evaluación efectuados por Funvisis en aquella oportunidad de los años 1981-1982 contaron con la asesoría escrita ad-honorem del Dr. Clarence Allen del Caltech de California quien estimó a principios de agosto 1982 el período de retorno preliminar del sismo máximo probable de la falla de San Sebastián en unos escasos centenares de años ("every few hundred of years") con base a criterios geomorfológicos de actividad tectónica cuaternaria apreciados en la traza activa de la falla por medio de la revisión de las aerofotografías de la Misión C8 de fecha anterior a las modificaciones de topografía acometidas para la ampliación del aeropuerto. Adicionalmente, el Dr. Burt Slemmons, especialista californiano mundialmente conocido en geología de terremotos, como el Dr. Allen, tuvo la oportunidad de revisar los afloramientos de la falla en la qda. Las Pailas en octubre 1983 en su condición de invitado al "Simposio de Neotectónica, Sismicidad y Riesgo Geológico en Venezuela y el Caribe".

En simultáneo pero en la región oriental, como interludio a los proyectos ECOS Nord 2003000090 y 2009000818, se colectan tanto 19 núcleos continuos cortos en las aguas marinas someras del golfo de Cariaco (**Tabla 1b**), como dos en las orillas suroccidentales de la laguna de Los Patos (39 en la **Figura 6**) a comienzos del año 2009 (**Tabla 2 y Figura 15**), a fines de evaluar la potencialidad de estos cuerpos de agua para preservar en su registro sedimentario la ocurrencia de remobilizaciones sedimentarias por la acción sísmica en el golfo y de la invasión marina por olas tsunamis (entiéndase tsunamitas) en las costas llanas al oeste de la ciudad de Cumaná. Estos 2 objetivos geográficos y científicos constituirán la motivación principal de la tesis

doctoral de la Ing. Iliana Aguilar llevada a cabo en ISTerre (Chambery, Francia) por un lado, y de la tesis de pregrado de los estudiantes Karellys Leal y Luis Scremin en la Escuela de Geología, Minas y Geofísica de la UCV, por otro lado. Los resultados de cada una de estas investigaciones han sido ampliamente difundidos; los del golfo de Cariaco son consultables en: Audemard *et al.* (2011b), Aguilar (2016), Aguilar *et al.* (2013, 2015a y b, 2016, 2017), mientras los de la laguna de Los Patos en Leal & Scremin (2011) y Leal *et al.* (2014). A título anecdótico, cabe traer a colación que cuando iniciábamos la toma de núcleos en el golfo de Cariaco a bordo del B/O Guaquerí II de la UDO, pedimos el muestreador de núcleos tipo piel de naranja, por mal amarre, en el primer intento de muestreo. Muy afortunadamente para el equipo científico de trabajo, gracias a la diligencia e ingenio de la tripulación del buque oceanográfico, contábamos con un viejo tomador de núcleos repotenciado a las pocas horas, que cumplió a cabalidad con los objetivos propuestos desde el inicio de la campaña.



Figura 15. Toma de núcleo continuo corto de los bordes de la laguna de Los Patos, al Oeste de Cumaná, estado Sucre, para el estudio de paleo-tsunamis.

Por lo promisorio que terminaron siendo los resultados arrojados por el estudio de la laguna de Los Patos en Cumaná, se redacta un proyecto entre 2011 y 2012, para ejecutar el estudio sistemático de todas las lagunas costeras entre Cabo Codera (edo. Miranda) y Laguna de Chacopata (edo. Sucre) a lo largo de la costa caribeña continental venezolana y de aquellas en las áreas insulares en el mar Caribe en el oriente del país, a fin de identificar invasiones marinas pasadas (tsunamitas) en asociación a sismos u otros mecanismos disparadores en el registro geológico reciente. El proyecto será aprobado y

financiado por FONACIT desde fines de 2013, el cual será bautizado TSUNAMI, pero identificado por el código FONACIT 2013000361. Entrará en ejecución a inicios del 2014, estando aún en curso,

a pesar que los recursos financieros de los 2 últimos años de proyecto se diluyeron con la inflación galopante de los años 2015-2017 y la hiperinflación del 2018 y 2019.

EXPLORACIONES PARA TSUNAMITAS REALIZADAS EN TIERRA FIRME, ORIENTE VENEZOLANO							
Proyecto FONACIT-ECOS Nord 2009000818. Años 2009-2012							
Nombre de localidad	Nº de calicata(s)	Nomenclatura calicata	Núcleo	¿Posible tsunamita?	Latitud (norte)	Longitud (oeste)	Referencia
TACARIGUA	1	TAC-003		NO	10°11'59"	65°39'31"	Oropeza et al. (2011)
UNARE	6	UNA-001		SI	10°7'59"	65°24'27"	Oropeza et al. (2011)
		UNA-002		SI	10°7'59"	65°24'27"	Oropeza et al. (2011)
		UNA-003		NO	10°7'57"	65°24'42"	Oropeza et al. (2011)
		UNA-004		SI	10°6'43"	65°19'17"	Oropeza et al. (2011)
		UNA-005		SI	10°5'50"	65°12'18"	Oropeza et al. (2011)
		UNA-006	UNA-006-C-1	SI	10°6'28"	65°17'16"	Oropeza et al. (2011, 2013)
PÍRITU	2	PIR-001		NO	10°2'45"	65°07'31"	Oropeza et al. (2011)
		PIR-002		NO	10°2'53"	65°06'04"	
CHACOPATA (Anzoátegui)	5	CHP-002		NO	10°5'17"	64°55'32"	Oropeza et al. (2011)
		CHP-003		SI	10°5'17"	64°55'32"	Oropeza et al. (2011, 2013)
		CHP-004		NO	10°5'46"	64°56'33"	Oropeza et al. (2011)
		CHP-005		NO	10°5'13"	64°57'43"	Oropeza et al. (2011)
		CHP-006		NO	10°5'13"	64°57'43"	Oropeza et al. (2011)
		IS-PS-C1		NO	10°9'8"	64°55'51"	Oropeza et al. (2012)
IS-PS-C2		NO	10°9'5"	64°55'51"			
PÍRITU NORTE	1	IS-PN-C1		NO	10°9'57"	64°57'43"	Oropeza et al. (2012)
EL JUNCAL	1	JUN-C1		NO	10°4'13"	64°48'20"	
LOS PATOS			LPATOS-09-01	SI	10°25'38"	64°12'20"	Audemard et al. (2011); Leal y Scremin (2011); Oropeza et al. (2011, 2013); Leal et al. (2014)
			LPATOS-09-02	NO	10°25'40"	64°12'07"	
PUNTA DELGADA	1	PTADELG-C1	PTADELG-C1-N5	NO	10°27'53"	64°06'32"	Oropeza et al. (2012)
CHACOPATA (Sucre)	7	CHACO-C1	CHACO-C1-N1	SI	10°42'15"	63°48'46"	Oropeza et al. (2012, 2015)
		CHACO-C2	CHACO-C2-N2	SI	10°42'15"	63°48'46"	
		CHACO-C3		NO	10°41'6"	63°47'57"	
		CHACO-C4		NO	10°40'15"	63°46'58"	
		CHACO-C5	CHACO-C5-N3	NO	10°39'2"	63°49'41"	
		CHACO-C6		NO	10°38'55"	63°49'33"	
		CHACO-C7	CHACO-C7-N4	NO	10°38'55"	63°49'27"	

Tabla 2. Estudios para reconocimiento de paleotsunamis realizados en Venezuela, en tierra firme, entre Cabo Codera (estado Miranda) y el Morro de Chacopata (estado Sucre), ordenados de Oeste a Este, en el marco del proyecto ECOS-Nord 2009000818, en los años 2009 y particularmente 2012, indicando la laguna estudiada, el número de calicatas excavadas y núcleos recuperados, sus coordenadas geográficas, la eventual ocurrencia de tsunamita y las referencias más significativas (Actualizado parcialmente por Javier Oropeza).

En el marco del proyecto FONACIT 2013000361, conjuntamente con el proyecto FONACIT-ECOS Nord 2009000818, se excavaron 26 calicatas y se colectaron 6 núcleos en aquellas localidades que lo ameritaron, en 2 campañas de campo realizadas en 2011 y 2012, acompañado por el co-responsable del proyecto ECOS Nord Dr. Christian Beck de la Université de Savoie (Francia), en las lagunas costeras que se extienden como un rosario de Oeste a Este a lo largo de la costa continental Caribe venezolana (Tabla 2; Oropeza et al., 2011, 2012, 2013, 2015): Tacarigua, Unare (Figura 4), Píritu, islas Píritu Norte y Píritu Sur, Chacopata (Anzoátegui), El Juncal, Punta Delgada y Chacopata (Morro de

Chacopata, estado Sucre; Figura 5). Sólo 3 lagunas al presente (Unare -40 en la Figura 6-, Chacopata-Anzoátegui y Chacopata-Sucre -41 en la Figura 6-), además de la laguna de Los Patos en Cumaná (Figura 15; 39 en la Figura 6), exhibieron evidencias sedimentarias lo suficientemente claras y diagnósticas, interpretables como tsunamitas al ojo desnudo, en su registro sedimentario holoceno (Audemard et al., 2011b; Oropeza et al., 2013, 2015). Los registros sedimentarios de estas lagunas de la costa de la ensenada de Barcelona (desde Tacarigua al Oeste a Juncal al Este, estados Miranda y Anzoátegui) y aquellas de Punta Delgada y Chacopata (en el estado Sucre) están siendo actualmente evaluadas

en el marco de la tesis de maestría en UCV del Ing. Javier Oropeza.

En el marco del mismo proyecto TSUNAMI, durante la realización de la cuarta campaña de medición de monumentos GPS en el oriente venezolano a inicios del año 2013, se aprovechó el tiempo disponible entre cambios de baterías de los equipos, para visitar, reconocer y muestrear

diversas lagunas en el Estado Nueva Esparta. En la isla de Margarita-Macanao, se exploraron las lagunas de La Restinga (sector El Saco), Chacachacare y Boca de Río; en la isla de Cubagua, la laguna de Punta Charagato; y en Coche, las lagunas de San Pedro de Coche y El Bichar (**Tabla 3**). Un total de 8 calicatas se excavaron y 5 núcleos se muestrearon. Todo este material espera por ser evaluado.

Exploraciones en búsqueda de tsunamitas realizadas en el estado Nueva Esparta						
Proyecto FONACIT-ECOS NORD 2009000818 Año 2013						
Nombre de localidad	N° de calicata(s)	Nomenclatura calicata	Núcleo	¿Posible tsunamita?	Latitud (norte)	Longitud (oeste)
PUNTA ARENAS					10°58'33"	64°24'12"
GUAYACANCITO			GUAYA-N1	NO	10°56'09"	64°12'39"
BOCA DE RIO	1	BOK-D-RIO C1		NO	10,95830°	64,18589°
LA RESTINGA (El Saco)	3	RES-C1	RES-N1A	NO	11,04372°	64,20253°
			RES-N1B			
		RES-C2	NO	11,03695°	64,19793°	
		RES-C3	RES.N3	SI		
CHACACHACARE	0			NO	10°57'52"	64°09'29"
ISLA CUBAGUA (Charagato)	0		CHA-N1 (sólo arena)	NO	10°49'52"	64°09'25"
ISLA DE COCHE (San Pedro de Coche)	2	S-PEDRO-C1	S-PEDRO-N1	?	10,80885°	63,97304°
		S-PEDRO-C2		?	CERCANA A C1	
ISLA DE COCHE (Bichar)	2	BICHAR-C2		NO	10°5'13"	64°57'43"

Tabla 3. Estudios para reconocimiento de paleotsunamis realizados en Venezuela, en el archipiélago que conforman el estado Nueva Esparta, en el marco del proyecto ECOS-Nord 2009000818, indicando la laguna estudiada, el número de calicatas excavadas y núcleos recuperados, sus coordenadas geográficas y la eventual ocurrencia de tsunamita.

Luego de esta larga incursión –en parte en el centro del país y la otra más intensa en el oriente– los estudios paleosísmicos volverán al occidente del país, y muy particularmente para excavar nuevamente trincheras de exploración paleosísmica a través de la falla de Boconó, en sus dos extremos. Las 5 nuevas trincheras a realizarse – para completar 16 a la fecha– volverán a la modalidad de ser excavadas con maquinaria (retro-excavadora) en vez de a mano; ello debido a que se contó con el apoyo de las alcaldías de los municipios “intervenidos”, con el préstamo sin costo de equipos propios, por lo cual estamos muy agradecidos. En 2012, por una parte, en el marco del proyecto LOCTI-FONACIT 2012002202 (identificado por el acrónimo GIAME), y como componente primordial de la tesis doctoral del Doctorado Individualizado de la Facultad de Ingeniería UCV de la colega de FUNVISIS Luz

María Rodríguez, se excavarán dos trincheras (Paraizo y El Zumbador; 24 y 25 en la **Figura 6**, respectivamente; **Tabla 1b** y **Figs. 6 y 16**) en el extremo más suroeste de la falla de Boconó, al sur de la cuenca de tracción de Los Mirtos, en el estado Táchira, más al sur del segmento Boc-a de la falla de Boconó definido por Audemard *et al.* (2000; 2014), el cual será nombrado en el trabajo doctoral de la Ing. Rodríguez segmento COLOVEN, como acrónimo de segmento COLOmbo-VEneZolano. Estas dos trincheras vendrán a confirmar que el comportamiento sismogénico de la falla de Boconó cambia radicalmente en el sector más SO del segmento Boc-a (Rodríguez *et al.*, 2012, 2013; Rodríguez, 2017), como lo antelaba y trataba de justificar Audemard (1997a; 2014) por la diferencia de comportamiento de la falla de Boconó entre las trincheras La Grita y Mis Delirios, donde los

períodos de los sismos se alargan al sur de la cuenca de tracción de Los Mirtos, hacia la frontera. Los resultados de estas 2 excavaciones confirman este claro comportamiento sismogénico diferencial entre en proximidad a la frontera (nuevo segmento COLOVEN) y en el segmento Boc-a (Rodríguez, 2017). La colega Rodríguez, a manera de hacer su estudio realmente transfronterizo, se une al grupo del Servicio Geológico Colombiano en la evaluación de otras 2 trincheras de evaluación paleosísmica, éstas en territorio colombiano, pero esta vez sobre la falla de Aguas Calientes, la cual se ubica en posición más septentrional y sub-paralela a la falla de Boconó, e intermedia entre ésta al Sur y la falla de Piedemonte Norte al Norte (Figura 6). Rodríguez *et al.* (2012, 2017) –a través de un estudio combinado neotectónico, paleosísmico y de sismología histórica-, además de determinar que la falla Aguas Calientes –la cual se ramifica en tres trazas subparalelas al cruzar la frontera- exhibe claras evidencias de actividad tectónica holocena, establece que es la responsable del destructor sismo de Cúcuta de 1875; cuyo análisis de daños está detallado en Rodríguez *et al.* (2015).



Figura 16. Trinchera El Zumbador (en páramo homónimo, edo. Táchira), a través del segmento COLOVEN de la falla de Boconó. Aspecto típico de trinchera excavada por retro-excavadora (“jumbo”) de pala de 1 m de ancho. De manera similar a la trinchera La Grita, la falla de Boconó aquí deforma los sedimentos lacustres más superficiales en pliegue en propagación de falla.

Por otra parte, y con fondos provenientes tanto de FONACIT 2012002202 (GIAME) como de FONACIT 2013000361 (TSUNAMI), en el marco de la tesis doctoral de la colega franco-venezolana Lea Pousse Beltrán, llevada a cabo en la Université Savoie-Mont Blanc (USMB, Chambéry, Francia), con tutoría compartida franco-venezolana, se excavan las tres trincheras más recientes a través de la falla de Boconó, en su segmento más septentrional, a inicios del año 2015, ubicadas todas en el estado Yaracuy (Tabla 1b y Figura 6): una en la localidad de Higuierón (26 en la Figura 6) y 2 en Don Ramón (27 en la Figura 6; una principal más larga y una auxiliar más corta –Figura 17-). Por insuficiencia de recursos para datar las muestras de suelos por el método del radiocarbono, la estudiante doctoral Pousse sólo logra estudiar y analizar la primera de las tres (Pousse, 2016; Pousse *et al.*, 2018).



Figura 17. Vista oblicua general de las trincheras excavadas en la localidad de Don Ramón (estado Yaracuy), a través del segmento Boc-e de la falla de Boconó, en el año 2015, cuyos análisis no han sido aún realizados por falta de fondos para cubrir las dataciones radiocarbónicas.

DISCUSIÓN y CONCLUSIONES

En el pasado siglo XX, en sus últimas 4 décadas, se realizaron estudios paleosísmicos en 12 estudios, siendo la región occidental la más estudiada, dado que sólo 2 corresponden al oriente, mientras el centro no contó con ninguno. En 11 de los 12 proyectos, la investigación estuvo vinculada directamente con la excavación de al menos una trinchera a través de la falla, mientras uno sólo se avocó a evidencias indirectas (19 calicatas excavadas en la costa noreste del estado Falcón, producto de la manifestación del fenómeno de licuación de sedimentos a raíz de dos eventos sísmicos de magnitud 5,4 y 5,0

ocurridos en la tormenta sísmica entre abril y mayo del año 1989). Este estudio de evidencias indirectas de FUNVISIS debe considerarse pionero en América Latina; y en el resto del mundo, coetáneo con otro realizado en Canadá a través de evidencias similares asociadas al sismo de Saguenay de 1988. Las fallas más estudiadas entonces eran: Caparo con 12 excavaciones, El Pilar con 5 y Boconó como Oca-Ancón con 4 trincheras por falla. El proyecto con más trincheras fue y sigue siendo aún DESURCA (Desarrollo Eléctrico Uribante-Caparo) con 22 excavaciones; el primero de todos los proyectos acometidos por FUNVISIS. De igual manera, el primero de los 12 estudios, ejecutado por Woodward-Clyde & Associates con 2 trincheras en 1968, junto a otros 2 realizados por una empresa de geotecnia privada en 1982 y por el autor en 1997 en consultoría privada, serán los únicos no dirigido por FUNVISIS en el siglo pasado. De manera global, 40 trincheras serán excavadas y estudiadas en el siglo XX en Venezuela, así como 23 calicatas.

Por su parte, en los 18 años transcurridos del siglo en curso, se han excavado 17 trincheras en el país, 13 por parte de FUNVISIS y 4 por externos. Dos de ellas fueron realizadas por la Universidad de los Andes en conjunto con la Universidad de Reno, las cuales lamentablemente resultaron estériles, ya que las mismas fueron excavadas en el piedemonte norte de los Andes de Mérida en el sector de Arapüey, en cercanía al sitio donde FUNVISIS en la década de los años 80 ya había realizado una primera, sin resultado alguno igualmente, debido a que el fallamiento inverso activo piemontino en esta zona se comporta sólo como pliegue superficial en propagación de falla inversa. Las 2 restantes fueron excavadas en la región central, a través del sistema de fallas de La Victoria, en el marco de consultoría privada. De las 13 trincheras excavadas por FUNVISIS en el siglo XXI, 12 fueron a través de la falla de Boconó: 7 en el marco del proyecto FONACIT 2001002492 (Agenda Gestión de Riesgos), 2 en el FONACIT 2012002202 (GIAME) y 3 compartidas entre los proyectos GIAME, FONACIT 2013000361 (TSUNAMI) y un proyecto francés. La treceava será la primera y única trinchera excavada en el centro del país al presente por parte de FUNVISIS, sobre la falla El Ávila del sistema de fallas Tacagua-Ávila, la cual se ejecutó para el estudio de amenaza sísmica para las obras del tren Caracas-Guarenas/Guatire (contrato FUNVISIS-ODEBRECHT N°CON-LCGG-021-

2007), bajo la coordinación de la colega Luz María Rodríguez.

De igual manera, FUNVISIS ha excavado 6 calicatas y preparado 10 afloramientos naturales para estudiar evidencias indirectas en el siglo en curso. En la región de occidente, particularmente en la zona comprendida entre la laguna de Mucubají y Santo Domingo, entre 2001 y 2002, en el marco del proyecto FONACIT-2001002492, en cooperación franco-venezolana, se revisan 7 afloramientos en el valle morrénico de Los Zepa en cercanía a la traza sur de la falla de Boconó y una a lo largo de la quebrada Mucuñuque (laguna de Mucubají). Además, en esta laguna y en el marco del mismo proyecto, se recuperarán 4 núcleos continuos de sedimentos lacustres de varios metros de longitud para analizar deformaciones en sedimentos blandos o remobilizaciones sedimentarias subacuáticas (evidencias indirectas). En 2009, 6 calicatas serán excavadas para estudiar fenómenos de licuación en asociación al sismo del 12 de septiembre de 2009; de manera similar a como se había hecho previamente en ocasión del sismo de Boca de Tocuyo de 1989. Además, 2 afloramientos antrópicos próximos a la falla de Bruscas fueron estudiados en 2012. A comienzos de ese año 2009, los estudios de evidencias indirectas en el Oriente venezolano se habían iniciado con resultados promisorios con la toma de 2 núcleos cortos en la laguna de Los Patos (Cumaná) y 19 en el golfo de Cariaco, que dieron pie a la presentación de las propuestas de los proyectos FONACIT-ECOS Nord 2009000818 y FONACIT 2013000361 (TSUNAMI).

Por último, en el marco del proyecto FONACIT-ECOS Nord 2009000818 (2010-2013), en cooperación internacional entre el Laboratorio ISTERre de la Universidad Savoie-Mont Blanc y FUNVISIS, proyecto coordinado por Christian Beck por Francia y el autor por Venezuela, se visitaron 9 nuevas lagunas costeras entre Cabo Codera y el Morro de Chacopata, en Venezuela continental, en dos misiones realizadas en 2011 y 2012, donde 3 de ellas resultaron tener evidencias convincentes de tsunamitas (**Tabla 2**). En 2013, este estudio fue completado con la evaluación de 8 lagunas costeras en el estado Nueva Esparta (islas de Margarita-Macanao, Coche y Cubagua). Todos estos estudios comprendieron la excavación y/o la toma de núcleos cortos de PVC hincados a mandarria, tal como lo desglosa la **Tabla 3**.

En resumidas, a la fecha, Venezuela ha contado con la excavación de 57 trincheras de exploración

paleosísmica a través de la expresión superficial de falla sospechada activa y 25 calicatas para estudiar evidencias de licuación (todas en la costa oriental de Falcón, luego de sismos en 1989 y 2009), así como la recuperación de 4 núcleos largos lacustres de alta montaña (en Mucubají) y de 19 núcleos cortos marinos (en golfo de Cariaco) para determinar removilizaciones de sedimentos blandos de origen sísmico. Por su parte, el estudio de paleotsunamis ha contado con la excavación de 34 calicatas y la recuperación de 14 núcleos distribuidos sobre 18 lagunas costeras (10 en tierra firme y 8 en el archipiélago que conforma el estado Nueva Esparta). Lo antes detallado atestigua a la larga y prolífica tradición y experticia paleosísmicas aglutinadas sobre 50 años (1968-2018). Debemos reconocer que la búsqueda de paleotsunamis en las costas orientales venezolanas no ha sido tarea fácil y no se ha conseguido gran número de indicios de estas incursiones marinas excepcionales; a pesar que las costas venezolanas hayan sido afectadas por tsunamis más de lo que normalmente se desea creer (e.g., Oropeza & Audemard, 2016). La explicación radica en el hecho que la altura de las olas tsunamis generadas durante sismos locales venezolanos, en contexto tectónico transcurrente (algunos de ellos asociados a deslizamientos submarinos; Audemard, 2019), no superan los 6-7 m (Audemard & Leal, 2017), lo cual hace que la propia incursión marina sea limitada en extensión, su preservación en el registro sedimentario cuaternario dificultosa y su puesta en evidencia una tarea ardua. Mucha investigación de campo queda aún por realizarse.

Por el contrario, los valores de las tasas tectónicas derivadas de investigaciones paleosísmicas, en ocasiones soportadas por estudios neotectónicos clásicos, y aquellas derivadas por geodesia satelital parecen más bien tender a converger. FUNVISIS, bajo el interés y guía del autor, ha incursionado en la determinación de las tasas de movimiento tectónico de las principales fallas del país por intermedio de redes de puntos geodésicos de alta precisión, medidos por equipos GPS diferenciales por campañas repetitivas, desde 2003 en el oriente y 2011 en el occidente (e.g., Reinoza *et al.*, 2014). La confirmación geodésica de las tasas de movimiento tectónico de las principales fallas del país estimadas a partir de datos geológicos (neotectónica + paleosismología; e.g., Audemard *et al.*, 2000 y referencias ahí citadas) es particularmente cierta para las fallas más rápidas del país, El Pilar, Boconó y Oca-Ancón; es decir, a aquellas fallas que en menos de

20 años de seguimiento geodésico se las ha podido estimar flechas de desplazamiento. Estos valores geodésicos ratifican que los estudios neotectónicos y paleosísmicos emprendidos por FUNVISIS desde 1980 son confiables, considerando las incertidumbres epistémicas que siempre quedan por resolver. El estudio geodésico que mejor ejemplifica lo antes indicado es el trabajo especial de grado de Mogollón (2018), realizado en la Universidad Central de Venezuela bajo la tutela del Dr. Carlos Reinoza, cuyos resultados confirman las tasas de movimiento geológico estimadas para el sistema de fallas de Oca-Ancón en Falcón occidental a partir de las excavaciones paleosísmicas de Hato La Pica y El Guayabal por Audemard (1996), así como por los estudios neotectónicos ejecutados en el noroccidente venezolano (Funvisis, 1987a, 1991b; Audemard, 1993; Audemard & Singer, 1994, 1996; Singer & Audemard, 1997), cercana a 2 mm/a en el estado Falcón.

Por último y no menos importante, la extensa lista de referencias citadas en el presente texto igualmente evidencia el interés de hacer público los resultados de tales investigaciones paleosísmicas ejecutadas en el territorio nacional. De igual manera, tal lista permite re-trazar la historia del desarrollo de esta disciplina en el territorio nacional.

AGRADECIMIENTOS

El Dr. André Singer, quien fuese mi mentor en muchas lides (en secuencia: profesor de la cátedra Geomorfología en la EGM y G-UCV por allá en 1980, tutor de trabajo especial de grado UCV – 1982 a 1984-, Jefe de Dpto. Ciencias de la Tierra en FUNVISIS –1986 a 1996-, Presidente de FUNVISIS –1996 a 2000- y por último actualmente asesor de la misma –2004 al presente-), ni cerca se imagina cuán torció o recentró mi vida profesional... ¡Mil gracias, Amigo! Probablemente, sabías mejor que yo, que viniendo de tierra de sismos y tsunamis y de la cuna de uno de nuestros más insignes sismólogos historiadores, Melchor Centeno-Graü, Cumaná – La Primogénita del Continente-, quedaría prendido a la tectónica activa, sismotectónica y geología de terremotos venezolana para siempre... Quiero igualmente reconocer públicamente todas las adiciones históricas que hemos incorporado a esta contribución de tu remembranza personal, André, para aquella ventana de tiempo (1980-1985) donde yo no participé directamente en estudio paleosísmico alguno, aunque era tesista tuyo y de Funvisis, trabajando en el estudio

neotectónico de la cuenca del Tuy medio entre 1982 y 1984, como insumo para el Proyecto Ferrocarril Caracas-Litoral para Ferrocarril (resultados en Funvisis, 1984).

El autor agradece especialmente, por una parte, a la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas –FUNVISIS–, no sólo por permitirle aplicar la paleosismología por trincheras a las principales fallas holocenas/activas del territorio nacional, pero por dejarle incursionar en otras técnicas o métodos complementarios en los estudios de paleosismología y de tectónica activa, ameritando ser citados la toma de núcleos continuos, la geodesia satelital y el georadar, así como descubrir otros objetos paleosísmicos: remobilizaciones sedimentarias, movimientos en masa, licuación de suelo y paleotsunamis; y hasta explorar y estudiar otros ambientes tectónicos bien disímiles a los nuestros: sismicidad asociada a la última desglaciación en el cratón escandinavo. Gracias especiales al Dr. Mörner de la Universidad de Estocolmo por esta grandiosa oportunidad, que concluyó con la edición especial de un libro ampliamente ilustrado y sobre un soporte de papel “glacé” de una excelente calidad (Mörner, N.-A., ed., 2003. Paleoseismicity of Sweden: a novel paradigm. JOFO Grafiska AB, Stockholm, Sweden). Por otra parte, y no menos importante, mi muy sincero agradecimiento a todos los entes contratantes y a las instituciones financieras por soportar tan costosas investigaciones sobre 36 años consecutivos (1982-2018). Este trabajo está particularmente dedicado a la memoria de buenos amigos y colegas neotectonistas-paleosismólogos, que nos abandonaron demasiado pronto de esta existencia terrenal. En Mérida, a los profesores ULA Jaime Laffaille y Carlos Ferrer Oropeza, quienes estuvieron involucrados en varias trincheras sobre la falla de Boconó (en **Figura 11**). De igual manera, la ex-colega FUNVISIS Maxlimer Vallée (en **Figura 5**), quien nos acompañó en la trinchera El Paraizo y en la búsqueda de tsunamitas en el Oriente venezolano. Para finalizar, agradecer independientemente a cada uno de los compañeros, colegas, profesionales, técnicos, propietarios y obreros que colaboraron o hicieron posible, de forma directa o indirecta, algún estudio paleosísmico en territorio venezolano, sobre 32 años dedicados por el autor a estos estudios, es humanamente imposible y sería una tarea titánica. ¡Son definitivamente demasiados! ¡Un millón de gracias a todos! Sin embargo, debo hacer una excepción. Sí deseo agradecer personalmente a Luz María Rodríguez por la actualización de la

Figura 6. Esta es una contribución a los proyectos FONACIT-2001002492 (Agenda Gestión de Riesgos), -2012002202 (GIAME), -2013000361 (TSUNAMI) y FONACIT-ECOS Nord 2003000090 y 2009000818. Gracias eternas a Christian Beck, “*Bill*” para sus amigos, por 15 buenos años de colaboración técnica y científica, en un ambiente de permanente fraternidad y hermandad; ¡realmente sin fronteras de tipo alguno! y ¡de igual a igual! ¡*Barby* seguirá siendo mi casa; y *La Churuata* seguirá siendo la tuya! Por último, deseo agradecer a dos revisores anónimos, por las mejoras aportadas a la versión original de este manuscrito. ¡Uno no es tan anónimo, como se podrán haber dado cuenta!

REFERENCIAS

- ACOSTA, L., 2009. Deformaciones superficiales en la ciudad de Valencia, asociadas al sistema de fallas de La Victoria, estado Carabobo, Venezuela. IX Congreso de Sismología e Ingeniería Sísmica. Resúmenes en CD, 15 p.
- AEQUA, 2009. Cuadro de la INQUA Environmental Seismic Intensity Scale 2007 - ESI 07. Versión española.
- AGUILAR, I., 2016. Étude des effets texturaux, minéralogiques et géochimiques associés à des séismes et des phénomènes connexes sur la sédimentation dans les Caraïbes sud-orientales (Faille d’El Pilar et Arc des Petites Antilles). Tesis doctoral, Universidad de Savoie Mont Blanc, Chambéry, Francia, 371 p.
- AGUILAR, I., BECK, C. & AUDEMARD, F. A. 2015b. Earthquake/tsunami geochemical signature of a major historical event in the Gulf of Cariaco (El Pilar Fault): impact of a major landslide on the connection with open sea? XIX INQUA International Congress, Nagoya, Japan, 26/07-02/08/2015.
- AGUILAR, I., BECK, C., AUDEMARD F. A. & DEVELLE, A-L., 2013. Signatures texturales et géochimiques liées à l’instabilité tectonique vs. a des changements paleoenvironnementaux, au cours du dernier millénaire dans le golfe de Cariaco (Vénézuéla nord-oriental). 14^{ème} Congrès Français de Sédimentologie, ASF-2013.
- AGUILAR, I., BECK, C., AUDEMARD, F. A., DEVELLE, A-L., BOUSSAFIR, M., CAMPOS C. & CROUZET, C., 2016. Last millennium sedimentation in the Gulf of Cariaco (NE Venezuela): Evidence for morphological changes of gulf entrance and possible relations with large earthquakes. Comptes Rendus Geoscience, 348: 70-79.

- AGUILAR, I., BECK, C., AUDEMARD, F. A., DEVELLE, A-L., CAMPOS, C., CARABALLO, E. & LEMUS, A. 2015a. Deconvolución de la señal geoquímica y textural del registro sedimentario durante los últimos 600 años en el golfo de Cariaco, con fines de interpretación paleo-tsunamigénica. *Boletín Oceanográfico UDO, Venezuela*, 54(2): 163-184.
- AGUILAR, I., SABATIER, P., BECK, C., AUDEMARD, F.A., CROUZET, C., URBANI, F., & CAMPOS, C., 2017. Calculation of the reservoir age from organic and carbonate fractions of sediments in the Gulf of Cariaco (Caribbean Sea). *Quaternary Geochronology*. doi: 10.1016/j.quageo.2017.01.001
- ALVARADO, M., 2008. Caracterización Neotectónica de la cuenca de Las 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. & RODRIGUEZ, L. M., 2007. Análisis paleosísmico de la falla de Boconó en el sector Lagunillas, estado Mérida, Venezuela 9° Congreso Geológico Venezolano, CD Resúmenes 7p. Caracas.
- ALVARADO, M., AUDEMARD, F.A., LAFFAILLE, J., OLLARVES, R. & RODRÍGUEZ, L. M., 2008. Paleoseismic investigation on thr Boconó fault between Las González and Estanques, Mérida Andes, Venezuela, 7° International Symposium on Andean Geodynamics, Nice, Francia, Resúmenes, 37-40.
- ALVARADO, M., AUDEMARD, F.A., LAFFAILLE, J., OLLARVES, R. & RODRÍGUEZ, L.M. 2009. Paleoseismic analysis of the Boconó fault, between the La Gonzalez-Estanques towns, Mérida state, Venezuela. 7° International Conference on Geomorphology, CD Abstracts: 1 p. Melbourne.
- AUDEMARD, F. A., 1984. Evaluación geológica de la Cuenca del Tuy para fines de investigaciones neotectónicas. Tesis de pregrado, Universidad Central de Venezuela, 2 Volúmenes, 226 p + anexos.
- AUDEMARD, F. A., 1985. Neotectónica de la Cuenca del Tuy. VI Congreso Geológico Venezolano, Caracas, 4: 2339-2377.
- AUDEMARD, F. A., 1989. Néotectonique du Languedoc méditerranéen: examen critique et synthèse des données existantes. Rapport D.E.A., Montpellier II (U.S.T.L.), Inédito. 60 p + 26 tablas + anexo.
- AUDEMARD, F. A., 1993a. Néotectonique, Sismotectonique et Aléa sismique du Nord-ouest du Vénézuéla (système de failles d'Oca- Ancón). Unpublished PhD thesis, Université Montpellier II, Montpellier, France, 369 p + appendix.
- AUDEMARD, F. A., 1993b. Trench investigation across the Oca-Ancon fault system, Northwestern Venezuela. Second International Symposium on Andean Geodynamics Oxford, Inglaterra (21-23 sept.), 51-54 (Resumen extendido).
- AUDEMARD, F. A., 1996. Paleoseismicity studies on the Oca Ancón fault system, northwestern Venezuela *Tectonophysics* 259: 67-80
- AUDEMARD, F. A., 1997a. Holocene and historical earthquakes on the Boconó fault system, southern Venezuelan Andes: trench confirmation. *Journal of Geodynamics*, 24 (1-4): 155-167.
- AUDEMARD, F. A., 1997b. Trench assessment of potential active faulting in Lote N° 4 of Complejo Petrolero y Petroquímico José Antonio Anzoátegui, Jose, Anzoátegui State, Venezuela. *CORAL* 83, 7 p.
- AUDEMARD, F. A., 1998. Contribución de la paleosismología a la sismicidad histórica: los terremotos de 1610 y de 1894 en los andes venezolanos meridionales. *Revista Geográfica Venezolana*, 39 (1-2): 87-105
- AUDEMARD, F. A., 1999a. Morpho-Structural Expression of Active Thrust Fault Systems in the Humid Tropical Foothills of Colombia and Venezuela. In: Frisch, W. (ed.), *Proceedings of the Fourth International Conference on Geomorphology Bologna 1997, Volume III. Zeitschrift für Geomorphologie*, 118:1-18.
- 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, in CD Rom.
- AUDEMARD, F. A., 2002. Ruptura de los grandes sismos históricos venezolanos de los siglos XIX y XX, revelados por la sismicidad instrumental contemporánea. XI Congreso Venezolano de Geofísica, Caracas, Venezuela, Nov. 17-20, 2002 (8 p; Extended Abstract in CD).
- AUDEMARD, F. A., 2003a. Estudios paleosísmicos por trincheras en Venezuela: métodos, alcances, aplicaciones, limitaciones y perspectivas. *Revista Geográfica Venezolana*, 44 (1): 2003 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. doi:10.1016/S1040-6182(02)00128-3
- AUDEMARD, F. A., 2005. Paleoseismology in Venezuela: Objectives, methods, applications, limitations and perspectives. *Tectonophysics*, 408: 29-61.
- AUDEMARD, F. A., 2007. Revised seismic history of El Pilar Fault, Northeastern Venezuela, after the Cariaco 1997 Earthquake and from recent preliminary paleoseismic results. *Journal of Seismology*, 11(3): 311-326. doi: 10.1007/s10950-007-9054
- 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., 2009. Segmentation of the Boconó Fault from paleoseismic trench results, Mérida Andes, Venezuela. VII International Conference on Geomorphology, Melbourne, Australia, 6-11/07/2009.
- 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: Forecasting Large Earthquakes from Active Faults in Time and Space. Awaji City, Awaji Island, Japan, 17-21 de enero de 2010, 6-8 (Extended Abstract).
- AUDEMARD, F. A., 2011. Multiple-trench investigations across the newly ruptured segment of the El Pilar fault in northeastern Venezuela after the 1997 Cariaco earthquake. In AUDEMARD, F. A., MICHETTI A. M. & MCCALPIN, J. (eds.): Geological criteria for evaluating seismicity revisited: 40 years of paleoseismic investigations and the natural record of past earthquakes, GSA Special papers N°479, Boulder, 133-157.
- AUDEMARD, F. A., 2014. Segmentación sismogénica de la falla de Boconó a partir de investigaciones paleosísmicas por trincheras, Venezuela occidental: Migración de la ruptura hacia el noreste en tiempos históricos. *Revista de la Asoc. Geol. Argentina*, 71 (2): 247-259.
- AUDEMARD, F. A., 2016. Evaluación paleosísmica del segmento San Felipe de la Falla de Boconó (Valle del Yaracuy, Venezuela noroccidental): ¿Responsable del terremoto del 26 de marzo de 1812? *Boletín Geología UIS*, 38(1): 125-149.
- AUDEMARD, F. A., 2019. Investigaciones Marinas y Costeras Desarrolladas por Funvisis a fin de Mejorar la Estimación de la Amenaza por Sismos y Tsunamis. *Boletín de la Academia de la Ingeniería y el Habitat*, 42: 893-930.
- AUDEMARD, F. A. & BELLIER, O. 1997. Trenching site selection for paleoseismic assessment on the Bocono fault, southern Venezuelan Andes. *Bulletin INQUA Neotectonics Commission* N° 20. 4 p. También en Web: http://io.ingrm.it/sfit/Bocono_1996.html.
- AUDEMARD, F. A. & DE SANTIS, F., 1991. Survey of liquefaction structures induced by recent moderate earthquakes. *IAEG-AIGI*, 44: 5-16.
- Audemard, F. A. & Leal, A., 2017. Reliability of first-hand accounts on the study of historical tsunamis in northeastern Venezuela (southeastern Caribbean Sea). *Annals of Geophysics*, 60 (6). doi: 10.4401/ag-7437.
- AUDEMARD, F. A. & MICHETTI, A., 2011. Geological criteria for evaluating seismicity revisited: 40 years of paleoseismic investigations and the natural record of past earthquakes. In AUDEMARD, F. A., MICHETTI A. M. & MCCALPIN, J. (eds.): Geological criteria for evaluating seismicity revisited: 40 years of paleoseismic investigations and the natural record of past earthquakes, GSA Special papers N°479, Boulder, 1-21. doi:10.1130/2011.2479(00).
- AUDEMARD, F. A. & SINGER, A., 1994. Parámetros sismotectónicos para fines de evaluación de la amenaza sísmica en el noroccidente de Venezuela. VII Cong. Venezolano Geof., Caracas, Venezuela (04-08 Sept.), 51-56.
- AUDEMARD, F. A. & SINGER, A., 1996. Active Fault Recognition in Northwestern Venezuela and its Seismogenic Characterization: Neotectonic and Paleoseismic approach. *Geofísica Internacional*, 35(3): 245-255.
- AUDEMARD, F. A. & SINGER, A., 1997. La Ingeniería de fallas activas en Venezuela: historia y estado del arte. Seminario Internacional de Ingeniería Sísmica: Aniversario del Terremoto de Caracas de 1967. Universidad Católica Andrés Bello, Caracas, 11-27.
- AUDEMARD, F. A., BECK, C. & CARRILLO, E., 2008. Deep-seated gravitational slope deformations along the active Boconó fault in the Santo Domingo and Aracay valleys, Mérida Andes, Venezuela. XVII Congreso Geológico Argentino, San Salvador de Jujuy, Argentina, 07-10 de octubre de 2008, 256.
- AUDEMARD, F. A., BECK, C. & CARRILLO, E., 2010. Deep-seated gravitational slope

- deformations along the active Boconó fault in the central portion of the Mérida Andes, western Venezuela. *Geomorphology*, 124: 164-177. doi:10.1016/j.geomorph.2010.04.020
- AUDEMARD, F. A., BECK, C. & CARRILLO, E., 2011A. Deformaciones gravitatorias profundas en laderas a lo largo de la falla active de Boconó en el sector central de Los Andes de Mérida, Venezuela Occidental. *Tribuna del Investigador*, 12(2): 28-36.
- AUDEMARD, F. A., BECK, C. & MÖRNER, N-A., 2003. Syn-sedimentary deformations in post-LGM periglacial environments in Sweden and Venezuela. SSA Annual Meeting, Puerto Rico, May 2003.
- AUDEMARD, F. A., BOUSQUET, J-C. & RODRÍGUEZ, J. A., 1995. Paleoseismicity Studies on a Natural Outcrop: the Urumaco Fault Case, Falcón Basin, Northwestern Venezuela. *Bull. INQUA N. C.*, 18: 48 (Abstract).
- AUDEMARD, F. A., BOUSQUET, J-C. & RODRÍGUEZ, J. A., 1999A. Neotectonic and paleoseismic studies of the Urumaco fault, northern Falcón basin northwestern Venezuela. *Tectonophysics*, 308: 23-35.
- AUDEMARD, F. A., BECK, C., CARRILLO, E. & COUSIN, M., 2002. Late Pleistocene-Holocene major earthquakes along the Boconó Fault (Mérida Andes, Venezuela): sedimentary record in los Zerpa moraine-dammed paleolake. *INQUA Congress "Environmental Catastrophes and Recovery in the Holocene"*, Brunel University, London, 29/08-02/09.
- AUDEMARD, F. A., BELTRÁN, C., DE SANTIS, F. & LUGO, M., 1990. Liquefaction on the Eastern Coastlands of Falcon State (Northwestern Venezuela) induced by moderate shallow earthquakes. *Bulletin of INQUA Neotectonics Commission*, 13: 47-50.
- AUDEMARD, F. A., DE SANTIS, F., LUGO, M., SINGER, A. & COSTA, C., 1988. Estudio de Amenaza Sísmica para las Urbanizaciones "La Punta" y "Mata Redonda", al Sur de Maracay. *FUNVISIS. Informe inédito para MINDUR*, 2 Vol. 188 p (I vol.) + 94 p (II vol.) + 4 anexos.
- AUDEMARD, F. A., MACHETTE, M., COX, J., DART, R. & HALLER, K., 2000. Map and Database of Quaternary faults and folds in Venezuela and its Offshore Regions; USGS Open-File report 00- 0018, 78 p (accessible from USGS webpage).
- AUDEMARD, F. A., OLLARVES, R., BETCHTOLD, M., DÍAZ, G., BECK, C., CARRILLO, E., PANTOSTI, D. & 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. doi: 10.1016/j.tecto.2007.08.20
- AUDEMARD, F. A., BECK, C., CANO, V., CARRILLO, E., CASTILLA, R., COUSIN, M., JOUANNE F., MELO, L., PATERNE, M. & VILLEMEN, T. 2002. Stability of morainic complexes cut by the Boconó fault, Mérida Andes, Western Venezuela. V International Symposium on Andean Geodynamics, Toulouse, France, sept. 15-18, 2002, 49-52 (Extended Abstract).
- AUDEMARD, F.A., BECK, C., LEAL, K., SCREMÍN, L., OROPEZA, J., CARRILLO, E., AGUILAR, I., LEAL, A., SINGER, A. & RODRÍGUEZ J.A., 2011B. Primeras evidencias geológicas de paleotsunamis en el oriente venezolano, producto de sismos históricos locales, entre Cabo Codera y Cumaná. *Memorias XIV Congreso Latinoamericano de Geología y XIII Congreso Colombiano de Geología*, Medellín, Colombia, 28 de agosto-2 de septiembre, 163-164 (resumen).
- AUDEMARD, F. A., PANTOSTI, D., MACHETTE, M., COSTA, C., OKUMURA, K., COWAN, H., DIEDERIX, H. & SAWOP PARTICIPANTS, 1999B. Trench investigation along the Merida section of the Boconó fault (central Venezuelan Andes) *Tectonophysics* 308, 1-21
- AUDEMARD, F. A., AZUMA, T., BAIOTTO, F., BLAIZE, S., BLUMETTI, A.M., BRUSTIA, E., CLAGUE, J., COMERCI, V., ESPOSITO, E., GUERRIERI, L., GÜRPINAR, A., GRÜTZNER, C., JIN, K., KIM, Y.S., KOPSACHILIS, V., LUCARINI, M., MCCALPIN, J., MICHETTI, A., MOHAMMADIOUN, B., MÖRNER, N. A., OKUMURA, K., OTA, Y., PAPANASSIOU, I., PAVLIDES, S., PÉREZ-LÓPEZ, R., PORFIDO, S., REICHERTER, K., RODRÍGUEZ-PASCUA, M.A., ROGOZHIN, E., SCARAMELLA, A., SERVA, L., SILVA, P., SINTUBIN, M., TATEVOSSIAN, R. & VITTORI, E., 2015. Earthquake Environmental Effect for seismic hazard assessment: the ESI intensity scale and the EEE Catalogue. *Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia – vol. 97. ISPRA, Servizio Geologico D'Italia*, 181 p.
- AUDEMARD, F. E., 1991. *Tectonics of Western of Venezuela*. PhD Thesis, Rice University, Texas, 245 p + anexos.
- AUDEMARD, F. E., 1997. Los Andes Venezolanos, visión alterna. VIII Congreso Geológico Venezolano, Porlamar, (1): 85-92.
- BECK, C., AUDEMARD, F. A., CARRILLO, E., CANO, V., CASTILLA, R. & MELO L., 2003. High

- resolution record of interferences between climatic fluctuations and seismicity: the Late Pleistocene-Holocene moraine-dammed lakes and palaeo-lakes crosscut by the Boconó Fault (Mérida Andes, Venezuela). 3rd International Limnogeology Congress, Tucson, Arizona, 29/03-02/04/2003.
- BELTRÁN, C., GIRALDO, C. & 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 (Abstract).
- BELTRÁN, C., DE SANTIS, F. & AUDEMARD, F. A., 1992. Ocurrencia de fenómenos de licuación en zonas deltaicas pobladas de Falcón oriental, Venezuela. II Simposio latinoamericano sobre Riesgo Geológico Urbano, II Conferencia Colombiana de Geología Ambiental.
- BELTRÁN, C., RODRÍGUEZ, J. A. & SINGER, A., 1996. The Pilar fault active trace (Northeastern Venezuela): neotectonic evidences and paleoseismic data. 3^{er} International Symposium on Andean Geodynamics: 153-156. Saint - Malo, France (Extended abstract).
- BELTRÁN, C. RODRÍGUEZ, J. A., SINGER, A. & RIVERO, C., 1999. La trinchera de Las Toscanas. Evidencias paleosísmicas de actividad reciente de la falla de El Pilar entre Casanay y Río Casanay. VI Cong. Venezolano de Sismología e Ingeniería Sísmica, Mérida, Venezuela (CD ROM).
- BROCHER, T. M., BALTAY, A. S., HARDEBECK, J. L., POLLITZ, F. F., MURRAY, J. R., LLENOS, A. L., SCHWARTZ, D. P., BLAIR, J. L., PONTI, D. J., LIENKAEMPER, J. J., LANGENHEIM, V. E., DAWSON, T. E., HUDNUT, K. W., SHELLY, D. R., DREGER, D. S., BOATWRIGHT, J., AAGAARD, B. T., WALD, D. J., ALLEN, R. M., BARNHART, W. D., KNUDSEN, K. L., BROOKS, B. A. & SCHARER, K. M., 2015. The Mw 6.0 24 August 2014 South Napa Earthquake. Seismological Research Letters, 86 (2A): 309-326. doi: 10.1785/0220150004
- BUENO, M. L., 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, Caracas, CD, 13 p.
- BUENO, M. L., OLLARVES, R. & AUDEMARD, F. A., 2005a. Evaluación paleosísmica por trincheras a lo largo del sector norte de la falla de Boconó (estados Lara y Yaracuy): Informe preliminar de campo. Informe Técnico Confidencial. FUN-028, FUNVISIS para FONACIT, 34 p.
- BUENO, M. L., OLLARVES, R. & AUDEMARD, F. A., 2005b. Interpretaciones preliminares en la caracterización sísmica de la falla de Boconó en el segmento Sabana Grande-Sanare, (estado Lara), con base en dos excavaciones paleosísmicas. 4^o Coloquio sobre Microzonificación Sísmica. Serie Técnica Funvisis 1-2005: 67-72
- CAPUTO, R., & HELLY, B., 2008. The use of distinct disciplines to investigate past earthquakes. Tectonophysics, 453: 7-19, doi:10.1016/j.tecto.2007.05.007.
- CARRILLO, E., 2006. L'enregistrement sédimentaire de la sismicité récente le long de la frontière sud-occidentale de la plaque Caraïbe (faille de Boconó): modalités et chronologie. Contribution à l'estimation de l'aléa sismique régional. PhD Thesis, Université de Savoie, Francia, 335 p.
- CARRILLO, E., BECK, C. & AUDEMARD, F. A., 2009. La paleosismología lacustre: Una nueva herramienta en la evaluación del peligro sísmico en Venezuela. Boletín de la Academia de las Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales, Caracas, Venezuela, 64(1): 9-20.
- CARRILLO, E., AUDEMARD, F. A., BECK, C. & COUSIN, M. 2002. Sedimentary disturbances in late Quaternary fluvio-lacustrine deposits of the Los Zerpa moraine, induced by the Boconó Fault, Mérida Andes, Venezuela. – 5th International Symposium on Andean Geodynamics, Toulouse, 16-18 September 2002, 125-128 (extended abstract; Poster).
- CARRILLO, E., BECK, C., AUDEMARD, F. A., MORENO, E. & OLLARVES, R., 2008. Disentangling Late Quaternary climate and seismo-tectonic controls on lake Mucubají sedimentation (Mérida Andes, Venezuela) Paleogeography, Paleoecology and Paleoclimatology, 259: 284-300.
- CARRILLO, E. AUDEMARD, F. A., BECK, C. & CASTILLA, R., MELO, L., CANO, V. & JOUANNE, F., 2003. Sedimentary record of earthquake-shaking and co-seismic offsets across a Late-Pleistocene lake: a case study along the Boconó fault, northwestern Venezuela. EGS-AGU-EUG Joint Meeting, Nice, April 2003.
- CARRILLO, E., AUDEMARD, F. A., BECK, C., COUSIN, M., JOUANNE, F., CANO, V., CASTILLA, R. MELO, L. & VILEMIN, T., 2006. A Late Pleistocene natural seismograph along the Boconó fault (Mérida Andes, Venezuela): The moraine-dammed Los Zerpa paleo-lake.

- Bulletin de la Societé Géologique de France 177: 3-17.
- CASTILLA, R. & AUDEMARD, F. A., 2007. Sand blows as tools for magnitude estimation of pre-instrumental earthquakes. *Journal of Seismology*, 11(4): 473-487. doi: 10.1007/s10950-007-9065-z
- CHOY, J., PALME, C., GUADA, C., MORANDI, M. & 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(1): 241-255.
- CIVICO, R., PUCCI, S., VILLANI, F., PIZZIMENTI, L., DE MARTINI, P. M., NAPPI R. & THE OPEN EMERGEO WORKING GROUP, 2018. Surface ruptures following the 30 October 2016 M_w 6.5 Norcia earthquake, central Italy, *Journal of Maps*, 14(2): 151-160. doi: 10.1080/17445647.2018.1441756
- CLARK, M.M. GRANTZ A. & MEYER R., 1972. Holocene activity of the Coyote Creek Fault as recorded in sediments of Lake Cahuilla. In Sharp, R.V. (Ed.): *Borrogo Mountains April 09, 1968 earthquake*. USGS Professional Paper 787: 112-130.
- CLUFF, L. & HANSEN, W., 1969. Seismicity and seismic geology of Northwestern Venezuela. Woodward_Clyde Associate. 2 vol. Shell de Venezuela. 78p. Inedito
- CRONE, A., MACHETTE, M. & BOWMAN, R., 1993. Geologic Investigations of the 1988 Tennant Creek Earthquake -Implications for Paleoseismicity in Stable Continental regions. U.S. Geological Survey Bulletin 2032-A, 51 p + appendices.
- DE SANTIS, F., ECHEZURÍA, E., AUDEMARD, F. A., BELTRÁN, C., ALVIAR, J. & FERREBUS, C., 1990. Los sismos de Abril y Mayo de 1989. Evidencias de Licuación. XI Seminario de Geotécnia, Caracas. Memoria Sociedad Venezolana de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, 205-225.
- DUERTO, L., 1998. Principales zonas triangulares del occidente de Venezuela: M.Sc. thesis, Universidad Central de Venezuela, Caracas, 176 p.
- DUERTO, L., ESCALONA, A. & MANN, P., 2006. Deep structure of the Mérida Andes and Sierra de Perijá mountain fronts, Maracaibo Basin, Venezuela. *AAPG Bulletin*, 90(4): 505-528.
- DUERTO, L., AUDEMARD, F.E., LUGO, J. & OSTOS, M., 1998. Síntesis de las principales zonas triangulares en los frentes de montaña del occidente venezolano. IX Congreso Venezolano de Geofísica (en CD-Rom, trabajo # 25).
- GHAFFIRI, A., SAURET, B., ROSIQUE T., BLES, J-L. & SEBRIER, M., 1993. Mise en evidence d'un paleoseisme sur la faille de la Moyenne Durance. *Géologie Alpine. Série speciale Résumés de colloques*, Chambéry, Francia (18-19 mayo), 2: 24-25 (Resumen).
- GRELLET, B., COMBES, PH., GRANIER, TH. & PHILIP, H., 1993. Sismotectonique de la France metropolitaine dans son cadre géologique et géophysique. *Mém. Soc. Géol. France*, Paris, 2 Vol., 164:1-75 + anexos.
- FUNVISIS, 1983. Estudio de Riesgo Sísmico. Proyecto Uribante-Caparo. CADAFAE. 145 p + anexos. Inédito.
- FUNVISIS, 1984. Estudio de riesgo sísmico Ferrocarril Caracas-Litoral. Informe final para Ferrocarril. 2 tomos + 5 anexos, Inédito.
- FUNVISIS, 1987a. Actividad cuaternaria y características sismogénicas del sistema de fallas de Oca-Ancón y de las fallas de Lagarto, Urumaco, Río Seco y Pedregal. Afinamiento de las características sismogénicas de las fallas de Mene Grande y Valera. Proyecto Costa Oriental del Lago de Maracaibo (COLM), Inédito. FUNVISIS para Maraven, 69 pp.
- FUNVISIS, 1987b. Tectónica cuaternaria, características sismogénicas de las fallas de Boconó, San Simón y piedemonte occidental andino y efectos geológicos asociados a la sismicidad histórica. Proyecto SUMANDES para Maraven. S.A., 90 p + anexos. Inédito.
- FUNVISIS, 1991a. Características neotectónicas y parámetros sismogénicos de las fallas activas cuaternarias, y efectos geológicos de la actividad sísmica en la región de proyecto y en las obras proyectadas. Proyecto Sumandes II. Funvisis para Maraven, S. A., 2 vol., 239 p + anexos. Inédito.
- FUNVISIS, 1991b. Actividad cuaternaria y caracterización sismogenética de las fallas de Lagarto y Río Seco. Afinamiento de las características sismogenéticas del sistema de fallas de Oca-Ancón y de Urumaco. Proyecto suministro Falcón- Zulia (SUFZ) MARAVEN, 91 p + anexos. Inédito.
- FUNVISIS, 1991c. Estudio de las manifestaciones de licuación de suelo ocurridas en Falcón Oriental durante los sismos de abril y mayo 1989. Aspectos Geológicos y Geotécnicos. Caracas, 123 p + anexos. Inédito.
- FUNVISIS, 1994. Estudio Neotectónico y de geología de fallas activas de la región nororiental de Venezuela. Proyecto INTEVEP

- 92-175, para INTEVEP, 3 vol., 258 p + anexos. Inédito.
- GIBSON-SMITH, J., 1974. Cabo Blanco and "Boeing Boeing". *Boletín Asoc. Venez. Geol., Min. y Petr.*, 14 (10): 236-244 + mapa anexo.
- LAFFAILLE, J., AUDEMARD, F. A. & ALVARADO M., 2008. San Antonio de Mucuño: Mudanza de un pueblo de doctrina luego del terremoto de 1674. XIV Congreso Venezolano de Geofísica, Caracas, Venezuela, 6-9 de octubre de 2008 (8 pp; CD format).
- LAFFAILLE, J., AUDEMARD, F. A. & ALVARADO, M., 2010. San Antonio de Mucuño, Mérida Andes, Venezuela: Relocation of a doctrine village following the 1674 earthquake. in Sintubin, M., Stewart, I.S., Niemi, T.M., and Altunel, E., eds.: *Ancient Earthquakes*. GSA Special Papers series, 471 39-46. doi: 10.1130/2010.2471(04).
- LAFFAILLE, J., FERRER, C. & RENGIFO, J. 1998. Los modernos cazadores de terremotos: el "South American Workshop on Paleoseismology" (SAWOP), Febrero 1997, Andes de Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, Universidad de Los Andes, Venezuela, 39(1-2): 327-338
- LEAL, K. & SCREMIN, L. 2011. Paleotsunamis en el registro geológico de Cumaná, estado Sucre, Venezuela oriental. Trabajo especial de grado: Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela, 204 pp.
- LEAL, K., SCREMIN, L., AUDEMARD, F. A. & CARRILLO, E., 2014. Paleotsunamis en el registro geológico de Cumaná, estado Sucre, Venezuela oriental. *Boletín de Geología UIS*, 36(2): 45-70.
- LÓPEZ, M., AUDEMARD, F. A. & VELASQUEZ, A., 2005. Evidencias geomorfológicas y estratigráficas de compresión holocena en el valle del Cauca, Colombia. X Congreso Colombiano de Geología, 26-29/07, Bogotá, Colombia (CD format).
- LÓPEZ, M., VELÁSQUEZ, A., TORO, G., MEYER, H., AUDEMARD, F. A. & HERMELIN, M., 2003. Evidence of Holocene compression in the Valle del Cauca, along the western foothills of the Central Cordillera of Colombia. XVI INQUA Congress, Reno, Nevada, July 2003.
- LUGO, M. CHACIN, C. & ADRIANZA, A., 1992. Sismicidad histórica. In AUDEMARD, F., SINGER, A., BELTRÁN, C., RODRÍGUEZ, J. A., LUGO, M., CHACÍN, C., ADRIANZA, A., MENDOZA, J. & RAMOS, C.: *Actividad tectónica cuaternaria y características sismogénicas de los sistemas de fallas de Oca-Ancón (tramo oriental), de la Península de* Paraguaná y región de Coro y de la costa nororiental de Falcón. FUNVISIS para INTEVEP, 2 Vol., 245 p + anexos. Inédito.
- MACHETTE, M., CRONE, A. & BOWMAN, R., 1993. *Geologic Investigations of the 1986 Marryat Creek Earthquake - Implications for Paleoseismicity in Stable Continental regions*. U.S. Geological Survey Bulletin 2032-B, 29 p + anexos.
- MCCALPIN, J.P., ed., 1996. *Paleoseismology*. San Diego, Academic Press, 588 p.
- MCCALPIN, J.P., ed., 2009. *Paleoseismology* (2nd ed.): San Diego, Academic Press, 647 p.
- MICHETTI, A. M., AUDEMARD F. A. & MARCO, S., 2005a. Future trends in paleoseismology: Integrated study of the seismic landscape as a vital tool in seismic hazard analyses in "Paleoseismology, integrated study of the Quaternary geological record for earthquake deformation and faulting". *Tectonophysics*, 408 (1-4): 3-21. doi:10.1016/j.tecto.2005.05.035
- MICHETTI, A. M., AUDEMARD, F.A. & MARCO, S., eds., 2005b. *Paleoseismology: Integrated Study of the Quaternary Geological Record for Earthquake Deformation and Faulting: Tectonophysics, Special Issue*, 408(1-4) 1-307.
- MICHETTI, A. M., ESPOSITO, E., GUERRERI, L., PORFIDO, S., SERVA, L., TATEVOSIAN, R., VITTORI, E., AUDEMARD, F. A., AZUMA, T., CLAGUE, J., COMERCI, V., GURPINAR, A., MCCALPIN, J., MOHAMMADIOUN, B., MORNER, N.A., OTA, Y. & ROGHOZIN, E., 2007. Intensity Scale ESI-07, in: L. Guerrieri, E. Vittori (Eds.). *Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia 74*. APAT, Rome, Italy, 41 p.
- MOGOLLÓN, J., 2018. Análisis de la cinemática y deformación inter-sísmica asociada a la falla de Oca-Ancón mediante el uso de la geodesia espacial de alta resolución. Trabajo Especial de Grado, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, 79 p.
- PERUCCA, L., AUDEMARD, F. A., PANTANO, A., AVILA, C.R., ONORATO, M.R. & VARGAS, H. N., 2012. Vergencias opuestas cuaternarias en el área de Acequiión, Provincia de San Juan. Argentina. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 25 (1-2): 5-15.
- PERUCCA L., AUDEMARD, F. A., PANTANO, A., AVILA, C.R., ONORATO, M.R. & VARGAS, H. N. 2013. Fallas cuaternarias con vergencias opuestas entre Precordillera Central y Oriental, Provincia de San Juan. *Revista Asociación Geológica Argentina*, 70(1): 291-302.

- OLLARVES, R., BUENO, M. L. & AUDEMARD, F. A., 2005. Evaluación paleosísmica de los segmentos de la falla Yaritagua y Quigua, edo Yaracuy, en el extremo nororiental de la falla de Boconó. IV Coloquio sobre microzonificación Sísmica, Barquisimeto. Serie Técnica FUNVISIS 1-2005: 183-186.
- OLLARVES, R., AUDEMARD, F. A. & LÓPEZ, M., 2006. Morphotectonic Criteria for the Identification of Active Blind Faulting in Alluvial Environments: Case Studies from Venezuela and Colombia. In: Latrubesse, E. (ed.) Tropical Geomorphology with special emphasis on South America, Volume VI. Zeitschrift für Geomorphologie, 145: 81-103.
- OROPEZA, J. & AUDEMARD, F. A., 2016. Contribución al estudio de tsunamis y otras amenazas costeras en Venezuela. Leal A. & Mastrangioli, G. (eds.): Historia, Terremotos y Tsunamis en Nuestra América. Ministerio del poder popular para la Cultura, Centro Nacional de Historia, Caracas, Venezuela, Nuestro Sur: Historia, Memoria y Patrimonio, 9(1):191-213.
- OROPEZA, J., AUDEMARD, F. A. & BECK, C., 2011. Informe de misión Adquisición de núcleos de sedimentos en la Ensenada de Barcelona, entre Carenero, edo. Miranda, y Cumaná, edo. Sucre, Venezuela. Proyecto ECOS-NORD PI 2009000818. Informe Técnico FUN-031, 2011, vi + 21 pp.
- OROPEZA, J., AUDEMARD, F. A. & BECK, C., 2013. Sedimentary record of paleotsunamis on the coastal lagoons of northeastern Venezuela. 14^{ème} Congrès Français de Sédimentologie, ASF-2013 (resumen).
- OROPEZA, J., AUDEMARD, F.A., BECK, C. & VALLEE, M., 2012. Informe de misión Adquisición de núcleos de sedimentos en la Ensenada de Barcelona, entre las isletas de Píritu, estado Anzoátegui, y el morro de Chacopata, edo. Sucre, Venezuela. Proyecto ECOS-NORD PI 2009000818. Informe Técnico FUN-057, 2012, v + 12 pp.
- OROPEZA, J., AUDEMARD, F. A., BECK, C. & VALLÉE, M., 2015. New potential sedimentary evidences of paleotsunamis on coastal lagoons of Chacopata, State of Sucre, Venezuela. 6th International INQUA Meeting on Paleoseismology, Active Tectonics and Archaeoseismology, Pescina, Fucino Italy (2015). 329-331 p CD (Abstract).
- OSORIO, J., MONTES, N., VELANDIA, F., ACOSTA, J., ROMERO, J., DIEDERIX, H., AUDEMARD, F. A. & NUÑEZ, A., -Eds.-, 2008. Paleosismología de la Falla de Ibagué. Publicaciones Geológicas Especiales, INGEOMINAS, Bogotá, Colombia, 29, 240 p.
- POUSSE-BELTRAN, L., 2016. Aléa sismique le long des grands décrochements vénézuéliens. PhD thesis, Université de Grenoble-Alpes, 303 p.
- POUSSE-BELTRAN, L., VASSALLO, R., AUDEMARD, F. A., JOUANNE, F., OROPEZA, J., GARAMBOIS, S. & ARAY, J., 2018. Earthquake geology of the last millenium along the Boconó fault, Venezuela. Tectonophysics, 747-748:40-53. doi: 10.1016/j.tecto.2018.09.010.
- REINOZA, C., AUDEMARD, F. A., BECK, C. & JOUANNE, F., 2014. An overview of the GNSS geodetic measurements applied to geodynamic studies in Venezuela. In: SCHMITZ, M., AUDEMARD, F. A. & URBANI, F. (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) Editorial Innovación Tecnológica, Facultad de Ingeniería-Universidad Central de Venezuela/FUNVISIS.
- ROCKWELL, T.K., DAWSON, T.E., YOUNG BEN-HORIN, J. ET AL., 2015. A 21-Event, 4,000-Year History of Surface Ruptures in the Anza Seismic Gap, San Jacinto Fault, and Implications for Long-term Earthquake Production on a Major Plate Boundary Fault. Pure Applied Geophysics 172: 1143-1165. doi: 10.1007/s00024-014-0955-z
- RODRÍGUEZ, J.A. & AUDEMARD, F. A. 2003. Sobrestimaciones y limitaciones en los estudios de sismicidad histórica con base en casos venezolanos. Revista Geográfica Venezolana, Universidad de Los Andes, 44(1): 47-75
- RODRÍGUEZ, L., 2017. Neotectónica y paleosismología en los Andes de Mérida, en la zona limítrofe colombo-venezolana: con énfasis en las fallas de Boconó y Aguas Calientes. Tesis doctoral, Doctorado individualizado Ciencias de la Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, 2 tomos (256 p + 213 p).
- RODRÍGUEZ, L. & AUDEMARD, F. A., 2012. Initial results of paleoseismic research in the southern end of Boconó fault, Venezuela. 3rd INQUA-IGCP-567 International Workshop on Active Tectonics, Paleoseismology Archaeoseismology, Morelia, Mexico, 175-176 (Abstract in CD).
- RODRÍGUEZ, L. & AUDEMARD, F.A., 2013. La falla de Boconó entre La Grita y San Antonio, estado Táchira Venezuela. XIV Congreso

- Colombiano de Geología. CD Resúmenes, Colombia.
- RODRÍGUEZ, L., SINGER, A., RODRÍGUEZ, J. A., AUDEMARD, F. A. & LEAL, A., 2012. El sismo fronterizo de Cúcuta, ocurrido el 18 de mayo de 1875 ¿Accidente tectónico responsable?, efectos geológicos que nos dan luces. VI Jornadas Venezolanas de Sismología Histórica, Caracas, Venezuela, 26 al 28 de marzo de 2012 (Resumen).
- RODRÍGUEZ, L. M., AGUILAR, I., CANO, V., OROPEZA, J. BUENO M.L., TAGLIAFERRO, M. & SINGER A., 2009. Informe Técnico de inspección, sobre evidencias geológicas observadas en el sismo de Morón, del 12 de septiembre de 2009. FUN- 022-2009, Funvisis, 17 p. Inédito.
- RODRÍGUEZ, L., OLLARVES, R., AUDEMARD, F. A., SINGER, A., COLÓN, S., VIETE, H. & MIRÓ, C., 2016. Estudio paleosísmico de la trinchera excavada en Santa Rosa en la traza activa de la falla El Ávila al este de Caracas, Venezuela. Edición especial Revista Geográfica de Venezuela, 57(1): 38-57.
- RODRÍGUEZ, L. M., DIEDERIX, H., TORRES, E., AUDEMARD, F. A., HERNÁNDEZ, C., SINGER, A., BOHÓRQUEZ, O. & YÉPEZ, S. 2017. Identification of the seismogenic source of the 1875 Cucuta earthquake on the basis of a combination of neotectonic, paleoseismologic and historic seismicity studies. *J. South American Earth Sciences*. doi: 10.1016/j.jsames.2017.09.019
- RODRÍGUEZ, L., SINGER, A., AUDEMARD, F. A. Y LA COLABORACIÓN DE: ICHASO, A., GÓMEZ, A., OROPEZA, J., ARAY, J., YEGRES, L., ZAMBRANO, O., & DASCO, A. 2012. Evaluación paleosísmica de la traza activa de San Sebastián en las instalaciones de la antigua planta de almacenamiento de combustible, (actual Núcleo de Desarrollo Endógeno Urimare, PDVSA), Catia La Mar, estado Vargas. Informe interno FUN-038, 13 p., Caracas. Inédito.
- RODRÍGUEZ, L. M., SARABIA, A. M., PÉREZ, C., MORA, H., SINGER, A., SALCEDO, E., YÉPEZ, S., CIFUENTES, H., DIEDERIX, H., TORRES, E., RODRÍGUEZ, J. A., AUDEMARD, F. A., GOMEZ, A. A. & LEAL, A. 2015. Inventario de daños y efectos geológicos co- y/o post-sísmicos del sismo ocurrido el 18 de mayo de 1875, en la frontera entre Colombia y Venezuela. *Boletín Academia Nacional de la Ingeniería y el Habitat - ANIH-*, 30: 104-263.
- RODRÍGUEZ, L., LÓPEZ, O. A., SINGER, A., MORALES, C., GONZÁLEZ J., NODA, F., GARCÍA, K., SCHMITZ, M., AUDEMARD, F. A., MONCADA, J., QUINTEROS, C., PAOLINI M., RADA, F., REINOZA, C., VIETE, H., MIRO, C. & COLÓN, S., 2011. Estudio de amenaza sísmica, procesos geomorfológicos activos y estimación de los efectos de sitio para el proyecto del tren Caracas- Guarenas-Guatire. Informe técnico de FUNVISIS para ODEBRECTH, FUN- 026, Inédito.
- SCHUBERT, C. 1982. Neotectonics of the Boconó fault, western Venezuela. *Tectonophysics*, 85: 205-220.
- SCHUBERT, C., 1986. Aspectos neotectónicos de la zona de falla de La Victoria y origen de la cuenca de Santa Lucía-Ocumare del Tuy, Venezuela. *Acta Científica Venezolana*, 37: 278-286.
- SCHUBERT, C., 1988. Neotectonics of the La Victoria Fault Zone, north-central Venezuela. *Annales Tectonicae*, 2(1): 58-66.
- SILVA, P. G., RODRÍGUEZ PASCUA, M. A. *ET AL.*, 2008. Catalogación de los efectos geológicos y ambientales de los terremotos en España en la Escala ESI-2007 y su aplicación a los estudios paleosismológicos. *Geotemas*, 6, 1063-1066.
- SINGER, A. & 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. In: Grases, J, (Ed.), *Diseño sismorresistente: Especificaciones y Criterios Empleados en Venezuela*, vol. XXXIII. Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales, Caracas, 25-38.
- SINGER, A. & SOULAS, J.P., 1983. La falla de Boconó entre Mérida y San Cristobal. In SCHUBERT, C., SINGER, A., Y SOULAS, J.P. (Guías Exc.): *La falla de Boconó entre Santo Domingo y San Cristobal. Guía de Excursión*. Simposio Neotectónica, Sismicidad y Riesgo Geológico en Venezuela y el Caribe, Caracas, XXXIII Convención AsoVAC, 62 p.
- SOULAS, J.P., 1983. Tectónica cuaternaria de la mitad sur de los Andes venezolanos; grandes rasgos. XXXIII Convención AsoVAC, *Acta Cient. Venez.*, 34(1): 525 (Resumen).
- SOULAS, J.P., 1985. Modelo de la tectónica sur de los Andes de Venezuela. In Davidovici, V. (Ed.): *Génie parasismique*. Presses Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 65 (Resumen).
- SOULAS, J.P., 1988. Analyse paléosismique par tranchées exploratoires. *Colloque Méthodologie et applications de la néotectonique; BRGM, Orléans*, 42-43 (Resumen).

- SOULAS, J.P. & AGGARWAL, Y., 1982. Recent tectonics of Southern Venezuelan Andes: Geological and Seismological data. AGU Fall Meeting, San Francisco, EOS 63(45): 1125-1126 (Abstract).
- SOULAS, J. P. & GIRALDO, C., 1994. Características sismogénicas de las fallas de Oca Ancón, Mene Grande y Valera. (Región Noroccidental de Venezuela). VII Cong. Venezolano Geof., Caracas, Venezuela, 35-42.
- SOULAS, J.P., SINGER, A. & ROJAS, C., 1981. Evaluación de la actividad reciente del sistema de falla Urica-San Mateo. Muelle de Jose-Planta de gas licuado. FUNVISIS para CORPOVEN S.A. Informe Inédito. 34 p + anexos.
- SOULAS, J.P., ROJAS, C. & SCHUBERT, C., 1986. Neotectónica de las fallas de Boconó, Valera, Tuñame y Mene Grande. Excursión No. 4, VI Congreso. Geológico. Venezolano, Caracas, (10): 6961-6999.
- TUTTLE, M., LAW, T., SEEBER, L. & JACOB, K. 1990. Liquefaction and ground failure in Ferland, Quebec triggered by the 1988 Saguenay earthquake. Canadian Geotechnical, 27: 580-589.
- VILLANI, F., CIVICO, R., PUCCI, S., PIZZIMENTI, L., NAPPI, R., DE MARTINI, P. M. & THE OPEN EMERGEO WORKING GROUP, 2018. A database of the coseismic effects following the 30 October 2016 Norcia earthquake in Central Italy. Scientific Data, 12 p. doi: 10.1038/sdata.2018.49
- WEISBORD, N.E., 1957. Notes on the geology of the Cabo Blanco area, Venezuela. Bulletin of the American Paleontology 38(165), 25 p + mapa.
- WELLS, D.L. & COPPERSMITH, K.J., 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement: Bulletin of the Seism. Soc. of America, 84: 974-1002.
- YEATS, R., 2001. Living with earthquakes in California: A survivor's guide. 1st ed., Oregon State University Press, Corvallis, USA, 406 p.
- YEATS, R., SIEH, K. & ALLEN, C., 1997. The Geology of Earthquakes. Oxford University Press, Oxford, UK, 576 p.