

Propuesta de metodología para el desarrollo de estudios paleosismológicos en Cuba

José F. Alcaide-Orpi*, José L. Cuevas-Ojeda, Enrique D. Arango-Arias, Yexenia Viltres-Milán y
Emelina Fernández-Soler

*Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas, Calle 17 No. 61 e/ 4 y 6, Reparto Vista Alegre, Santiago de Cuba,
CP: 90400. Teléfono: 72720830. Email: jalcaide@cenais.cu*

<i>Recibido: agosto 2018</i>	<i>Aceptado: Diciembre 2018</i>
------------------------------	---------------------------------

Resumen

Acontecimientos a nivel mundial han demostrado que los eventos sísmicos del interior de placa pueden ocurrir asociados a fallas con sismicidad baja actual por lo que sus riesgos potenciales no pueden ser evaluados solamente a base de los registros sísmicos, es por ello que los estudios paleosísmicos en este tipo de fallas nos pueden ofrecer un importante registro cronológico acorde a su período de recurrencia. Esta investigación tuvo como objetivo principal la implementación de una metodología para estudios paleosísmicos en fallas activas del interior de placas en Cuba, partiendo de la revisión de toda la información disponible sobre investigaciones y metodologías para estudios paleosísmicos a nivel mundial. Paralelamente se realizó una recopilación de la información geológica, geofísica y sismológica existente en el país. Como resultado se obtuvo la selección y propuesta de una metodología para el desarrollo de estudios paleosismológicos en Cuba, que representará un paso de avance para su implementación en futuras investigaciones para un caso de estudio.

Palabras claves: paleosismología, sismotectónica, fallas activas

Proposal of methodology for the development of paleosismological studies in Cuba

Abstract

Events worldwide have shown that seismic events inside the plate can occur associated with faults with current low seismicity so their potential risks cannot be evaluated only based on seismic records, which is why paleoseismic studies in These types of failures can offer us an important chronological record according to their recurrence period. The main objective of this research was the implementation of a methodology for paleoseismic studies in active faults of the interior of plates in Cuba, starting from the review of all available information on research and methodologies for paleoseismic studies worldwide. Compilation was made in parallel of the geological, geophysical and seismological information existing in the country. As a result, the selection and proposal of a methodology for the development of paleoseismological studies in Cuba was obtained.

Keywords: paleoseismology, seismotectonics, active faults

1. Introducción

El estudio de las fallas consideradas como sismogénicas, para intentar predecir su comportamiento futuro, requiere de información sobre la localización, recurrencia y magnitud de los terremotos que ocurrieron en el pasado y que no pueden obtenerse a partir de los registros históricos, existiendo como única fuente de información las huellas que terremotos importantes pudieron haber dejado en el registro geológico. Considerando que algunas de las fallas activas pueden no haber generado sismos significativos en el período que se cubre con la información histórica, se hace necesario recurrir a los estudios paleosismológicos.

La paleosismología ha sido definida como la identificación y estudio de terremotos prehistóricos y está perfilada a la identificación y estudio de estos a través de las evidencias observadas en sedimentos cuaternarios deformados. Esta disciplina aporta la información necesaria para la caracterización del peligro sísmico regional y sus técnicas de campo se basan en un análisis detallado de las deformaciones que afectan a los materiales cuaternarios (Costa 2004).

Como principales objetivos la Paleosismología se plantea:

- 1) La identificación de evidencias de rupturas superficiales asociadas a sismos en el registro estratigráfico de sedimentos jóvenes.
- 2) Interpretar el periodo de recurrencia de eventos sísmicos con ruptura y la posible magnitud de los mismos.
- 3) Conocer el intervalo temporal provisto por la sismicidad histórica e instrumental para la caracterización de la recurrencia de actividad de fallas y del peligro sísmico regional.

En esta investigación se ha planteado como objetivo principal, la revisión de toda la información disponible sobre estudios y metodologías para estudios paleosísmicos a nivel mundial y los antecedentes que pudieran existir de estos trabajos en el país, teniendo como objetivo principal y de mayor novedad, la selección y propuesta metodológica para el desarrollo de estudios paleosismológicos en Cuba para su aplicación futura en casos de estudios.

2. Materiales y Métodos

Las investigaciones paleosismológicas permiten extender hacia atrás en el tiempo, el límite de observación e interpretación y posibilitan reconstruir la sismicidad prehistórica de una región, aportando información sobre el número de paleoterremotos, paleomagnitudes, tasas de desplazamiento e intervalos de recurrencia de fuertes terremotos en regiones donde se dispone de escasa información sismológica y las fallas no presentan evidencias claras de deformaciones recientes en superficie (Mc Calpin 1996, Yeats *et al.* 1997).

Los antecedentes de investigaciones neotectónicas en fallas de intraplaca no son numerosos ya que el mayor desarrollo de las mismas hasta el presente se concentra en zonas de borde de placa. Sin embargo, las contribuciones de Wallace 1977, Bucknam y Anderson 1979, Crone *et al.* 1992, Machette *et al.* 1993 y Mc Calpin 1996, reportan importante información para el conocimiento y evaluación del peligro sísmico en regiones sísmicamente activas (Sagripantiet *al.* 2011).

Muchos autores han abordado los principales conceptos y discusiones sobre la problemática paleosismológica, destacando a Wallace 1981, Wallace 1986, Vita-Finzi 1986, Schwartz 1988, Crone y Omdahl 1987, Vittoriet *al.* 1991, Pantosti y Yeats 1993, Yeats *et al.* 1997, McCalpin 1996, Pantosti 1997 y Meghraoui y Crone 2001 entre otros.

En el caso de Cuba solo Zapata en el 2010 intentó realizar un estudio paleosismológico y sismotectónico de la capacidad sismogeneradora de la falla Pinar pero los resultados no fueron los esperados por presentarse dificultades con el financiamiento necesario para culminar las investigaciones previstas.

Diversas han sido las metodologías utilizadas para seleccionar los sitios para realizar los estudios paleosismológicos, entre los numerosos criterios hay un consenso con el uso de los sismológicos, estratigráficos, geomorfológicos y geológicos como los propuestos por Philip y Meghraoui, 1983, Mc Calpin, 1996, Pantosti, 1997 y Costa, 2004.

Las evidencias paleosísmicas en el registro estratigráfico, según los reportes históricos, indican que los terremotos que generan en superficie algún tipo de morfología característica, corresponden comúnmente a magnitudes $M > 6,5$. Los eventos menores tienen muy poca oportunidad de producir algún tipo de evidencia en la morfología o en la estratigrafía asociada a una estructura y de ser reconocidos en los estudios paleosísmicos. (Costa 2004).

Estas evidencias se complejizan cuando el movimiento de las estructuras es reciente y son afectadas por la sedimentación y erosión o cuando las deformaciones no alcanzan a generar una expresión morfológica en superficie. Hay que tener presente que las deformaciones paleosísmicas muchas veces son muy dudosas y complicadas y pueden confundirse o acoplarse con estructuras sedimentarias o deformaciones post-deposicionales y no necesariamente tener un carácter tectónico. Por esto es imprescindible la observación de diversos tipos de evidencias a lo largo de diferentes exposiciones de una ruptura sísmica y una adecuada comprensión de los procesos de erosión-depositación en ambientes sedimentarios del Cuaternario, para así facilitar una correcta interpretación de las deformaciones del registro estratigráfico (Costa 2004).

Estas investigaciones paleosismológicas necesitan de un estudio detallado del área, aunque la localización de los sitios apropiados para realizar observaciones de campo, requiere de un análisis del terreno a escala regional y de semidetalle. Esta actividad está centrada en el reconocimiento y análisis de las evidencias geomorfológicas de la actividad del fallamiento o plegamiento reciente, lo cual constituye el dominio de la geomorfología tectónica o morfotectónica (Bull y Wallace, 1985; Doornkamp, 1986; Burbank y Anderson, 2000).

3. Resultados y Discusión

Partiendo de una revisión de la información disponible sobre estudios paleosismológicos y la experiencia obtenida a nivel mundial se propone la implementación de una secuencia metodológica para ejecutar estudios de la paleosismicidad en Cuba.

La investigación se podrá diseñar en detalles pero constará de forma generalizada de la siguiente secuencia metodológica:

Interpretación y análisis de imágenes satelitales y fotos aéreas(Fig.1), se utiliza para identificar los rasgos del paisaje y detalles topográficos como evidencias de pequeñas deformaciones producidas por eventos sísmicos históricos, con énfasis en los depósitos cuaternarios, que permiten también determinar los patrones de deformación de la tectónica local y regional.

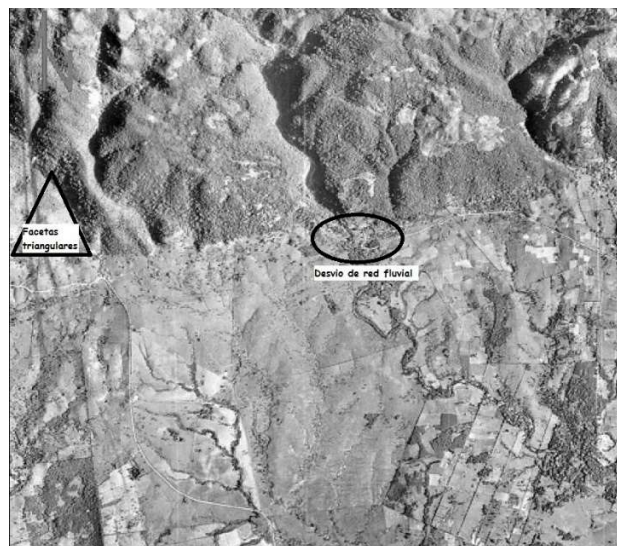


Fig. 1. Interpretación de Fotos aéreas

La fotointerpretación se debe realizar a partir de zonas amplias del área estudiada, detallando las características generales de la zona de falla y tomando en consideración la observación de rasgos geomorfológicos, como son: escarpes de fallas, ríos desplazados, acumulaciones aluviales, etc, pudiéndose seleccionar zonas con características de posibles preservaciones de registros de terremotos recientes.

Estudios geomorfológicos. Estos constituyen una valiosa herramienta en las investigaciones neotectónicas y estudios de la tectónica activa.

Las formas del terreno y los depósitos cuaternarios presentes en una determinada área, son el resultado de la interacción de los procesos de deformación que afectan la superficie del relieve y de los procesos erosivos y sedimentarios. Importante para la identificación de los rasgos de los depósitos y formas del terreno formados por la ocurrencia de un terremoto y que son denominados rasgos cosísmicos y que deben diferenciarse muy bien de los rasgos no sísmicos formados por procesos de erosión, deposición y deformación no sísmica.

En este tipo de análisis también se debe tratar de identificar rasgos neotectónicos que incluyan evidencias secundarias indirectas como son las anomalías en el patrón de la red de drenaje, lagunas asociadas a escarpes, análisis de pendientes, paleoderrumbes, estructuras de fracturación como evidencias de la actividad cuaternaria, etc.

Otro criterio de análisis es el estudio morfotectónico de los frentes de falla que constituyen un indicador neotectónico a largo plazo debido a su preservación como rasgo morfológico (Fig.2). En este caso hay que considerar que esta morfología del terreno tiende a degradarse con el paso del tiempo y surgen modificaciones de las mismas como consecuencia de la erosión.

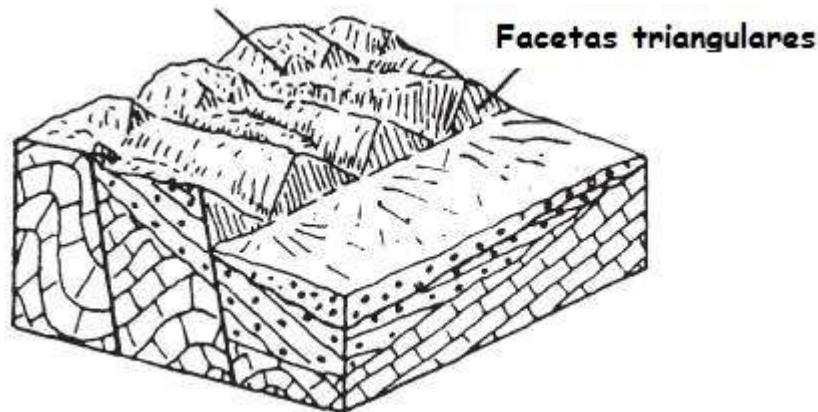


Fig.2. Facetas triangulares de los frentes de montañas. Fuente: McCalpin, 1996

Utilización de métodos geofísicos: Para determinar la estratigrafía y estructura superficial de la zona de falla estudiada se emplearán un conjunto de métodos geofísicos de reconocimiento, entre los de mayor utilización están los métodos de sísmica de refracción y métodos eléctricos (Fig.3) que aportarán información para caracterizar la geología enterrada en la zona de falla estudiada y las características de la zona tectónica que no tengan una clara expresión en superficie.

El uso y aplicación de estas técnicas puede estar condicionado a diferentes factores, climáticos, topográficos, de accesibilidad, complejidad tectónica, disponibilidad de recursos financieros, entre otros.

Los métodos sísmicos pueden ser de gran utilidad para determinar la geometría de la falla activa en profundidad. Estos métodos contribuyen durante los estudios de paleosismología a detectar la falla y luego caracterizar los estratos en el subsuelo que han sido afectados por el fallamiento.

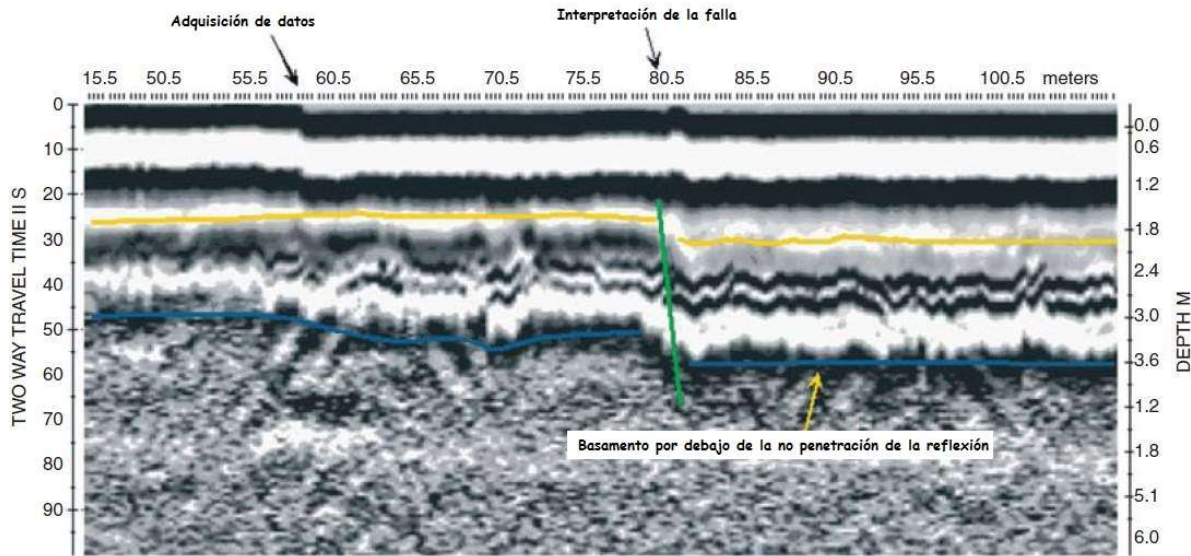


Fig.3. Empleo de Métodos Eléctricos, McCapin, 1996

Ejecución de recorridos de campo: Utilizado para realizar la cartografía geológica con el objetivo de documentar rasgos estructurales en afloramientos (Fig.4) como datos de ruptura y dataciones en el registro estratigráfico, observaciones de los desplazamientos y tener en cuenta las evidencias morfológicas de formas del relieve observadas en la superficie del terreno y su posible vinculación con la actividad tectónica de la zona estudiada, pudiendo ser expresadas con esquemas, fotografías y dibujos.

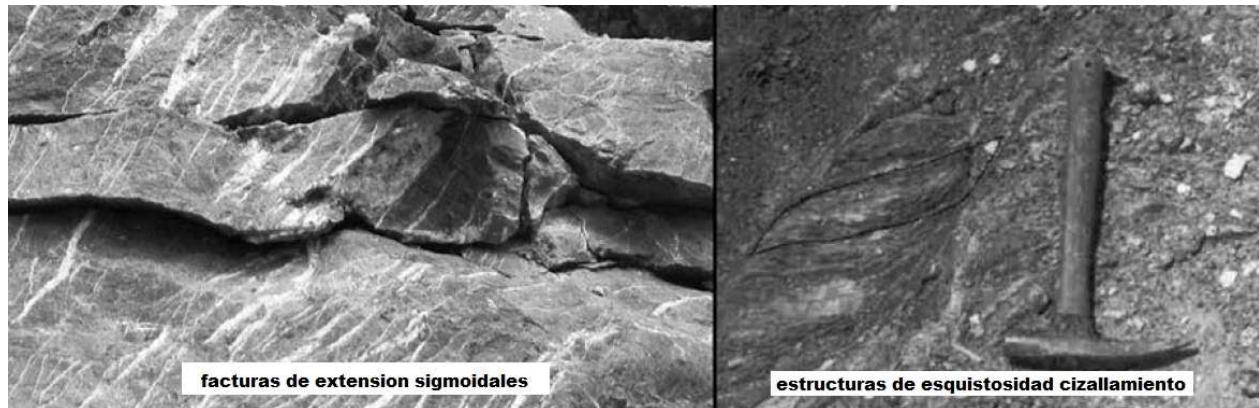


Fig. 4. Observaciones de campo. Fuente: Ordaz, 2013

Excavación de trincheras

La correcta localización de una excavación de la trinchera es decisiva para el éxito o el fracaso de los trabajos. Muchos autores plantean que no siempre el rasgo morfológico más espectacular es el que brinda mejor información paleosismológica. Los aspectos que deben tenerse en cuenta para una mejor localización, varían según el sitio y el problema a estudiar, pero deben considerarse entre otros aspectos los siguientes:

- . Existencia de un registro sedimentario lo más completo posible, descartando los sectores que hayan estado sometidos a una erosión importante.

- . Preservar el techo y base de los mismos horizontes estratigráficos. Ello permite calcular el desplazamiento acumulado en diferentes estratos e individualizar horizontes de paleoeventos.
- . Evitar que existan modificaciones antrópicas.
- . Presencia de materiales idóneos para realizar las dataciones.
- . Existencia de horizontes guía o al menos una diferenciación adecuada de las unidades estratigráficas.

Tomando en consideración toda la secuencia metodológica previa, se deben aportar los suficientes criterios para la selección, localización y orientación de los sitios para la excavación de las trincheras, tomando en consideración los aspectos antes mencionados. La trinchera debe tener unos pocos metros de longitud y con la seguridad de cortar de forma perpendicular la falla estudiada, por lo que se requiere conocer con precisión, el trazado de la falla, lo que se consigue en etapas previas mediante un estudio anterior de detalle geológico y geomorfológico (Masana *et al.* 2011).

Las paredes de las trincheras deben ser por lo general verticales, aunque en algunos países como Japón las paredes se abren con una inclinación de 45°, lo cual en muchos casos facilita la estabilidad y preservación de las mismas.

Luego de excavada la trinchera se realizan los trabajos de limpieza de las paredes para después realizar la descripción detallada de la información expuesta en sus paredes y piso, la cual es reflejada a escalas 1:50 o más detalladas. Para ello, la técnica de trabajo más común consiste en establecer cuadrículas en red de 1x1 m. o 0,50x1 m. en ambas paredes de la trinchera, marcando con tachuelas de colores los posibles estratos y fallas que evidencian paleoterremotos, dibujando y describiendo cuadro a cuadro los contactos entre unidades, estructuras y todo rasgo de interés. Para mayor precisión del dibujo, se controla la ubicación de los rasgos relevados mediante un sistema de coordenadas cartesianas, cuyos puntos origen se localizan en el extremo inferior izquierdo de cada cuadrícula. Posteriormente en trabajo de gabinete se digitaliza el registro sedimentario y de estructuras.

También utilizada la técnica del fotografiado, como auxilio en la delimitación de las diferentes unidades sedimentarias expuestas y la posición de los diferentes puntos de recogida de muestras, para su análisis y posterior datación de cada unidad sedimentaria, con el objetivo de la búsqueda de las etapas históricas de los grandes sismos ocurridos en el pasado de esta falla (Fig.5).



Fig. 5. Ejecución de trincheras. Fuente: Sagripanti, 2006

Datación de los sedimentos.

Entre los métodos más usados para la datación, destaca el C^{14} que permite datar muestras orgánicas como carbón, el U/Th que permite datar carbonatos depositados en un medio acuoso, la *termoluminiscencia* y la

luminiscenciaestimulada ópticamente, que permiten datar el tiempo transcurrido desde que la muestra fue expuesta a la luz o a altas temperaturas (Masana et al. 2011). Se recomienda utilizar al menos dos métodos de datación y a la vez correlacionarlo con el conocimiento geológico y de datación relativa de la región.

Hay que tener en consideración que para obtener parámetros como la recurrencia, el tiempo transcurrido desde el último terremoto o la velocidad de deslizamiento media de la falla, es necesario datar las unidades afectadas por la deformación y las no deformadas. Ésta es una parte compleja del proceso ya que, a pesar de que se han desarrollado diversos métodos de datación en las últimas décadas, es difícil encontrar muestras susceptibles de ser fechadas.

Conclusiones

- 1- Aunque en años recientes en Cuba se intentó realizar estudios de paleosismicidad en la zona de la Falla Pinar, es la primera vez que se propone una metodología integral para el estudio paleosismológico en Cuba que se podrá implementar en futuras investigaciones.
- 2- Con los resultados obtenidos y el conocimiento adquirido consideramos que estamos en condiciones para realizar una investigación completa de paleosismicidad en un caso de estudio en Cuba, siempre y cuando se identifiquen vías de posible financiamiento para realizar las trincheras, dataciones de los sedimentos y capacitación para la interpretación de los resultados.

Referencias

- Bull, W. y Wallace, R., 1985. Tectonic geomorphology. *Geology*, 13: 216-217.
- Bucknam, R.C. y Anderson, R.E., 1979. Estimation of fault-scarp ages from a scarp-heightslope- angle relationship. *Geology* 7: 11-14.
- Burbank, D. y Anderson, R., 2000. Tectonic geomorphology, Blackwell, 274 p.
- Crone, A. y Omdahl, E., 1987. Directions in Paleoseismology. United States Geological Survey Open-File Report. 87-673, 456 p.
- Crone, A.J., Machette, M.N. y Bowman, J.R., 1992. Geologic investigations of the 1988 Tennant Creeck, Australia, earthquakes implications for paleoseismicity in stable continental regions. U.S. Geological Survey Bulletin 2032-(A), 51p.
- Crone, A.J., Machette, M.N. y Bowman, J.R., 1997. Episodic nature of earthquake activity in stable continental regions revealed by paleoseismicity studies of Australian and North American Quaternary faults. *Australian Journal of Earth Sciences* 44: 203-214.
- CofiñoArada, C.E., Cáceres, D., 2002. Efectividad de la utilización de los métodos microtectónicos en el desciframiento de la evolución de estructuras tectónicas (Falla Pinar). *Minería y Geología N 2 del Vol. XIX*.
- Cofiño C. E. y Cáceres D., 2003. Particularidades estructurales y determinación del stress principal a partir de la información de un perfil en la parte oriental de la Sierra del Rosario, Pinar del Río, Cuba. *Minería y Geología*, 19 (1-2): 51-58.
- Costa, C., 1996. Análisis neotectónico en las sierras de San Luis y Comechingones: Problemas y métodos, *13º Congreso Geológico Argentino Actas* 2, 285–300.
- Costa, C.H., 2004. Microtectónica en el Cuaternario?: Métodos y aplicaciones de la paleosismología. Asociación Geológica Argentina, Serie D, Publicación Especial 7: 9-19, Buenos Aires.
- Doornkamp, J., 1986. Geomorphological approaches to the study of neotectonics. *Journal of the Geological Society of London*, 118: 335-342.
- Machette, M.N., Crone, A.J. y Bownan, J.R., 1993. Geologic investigations of the 1986 Mayrrat Creek, Australia, earthquakes-implications for paleoseismicity in stable continental regions. *Geological Survey Bulletin* 2032 (B): 1-29.
- Masana, E., Rodríguez, M., Martínez, J., 2011. Los paleoterremotos: estudiando el pasado para entender el futuro. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra* (19,3) ISSN 1132-9157. 305-316.
- McCalpin, J., 1996. Paleoseismology. Academic Press, 588 p., London.

- Megrhaoui, M. y Crone, A. (Editores), 2001. Active faulting and paleoseismology. *Journal of Seismology Special Issue*, 5: 1-474.
- Ordaz A., Hernández J. R., Cofiño C. E., Méndez A. P., Galaz G., 2013. Análisis estructural y morfotectónico en los municipios San Cristóbal y Candelaria, Cuba Occidental: contribución a los estudios de peligrosidad sísmica de la Falla Pinar. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM ISSN 0188-4611*, Núm. 82, 2013, pp. 7-23
- Pantosti, D. y Yeats, R., 1993. Paleoseismology of great earthquakes of the late Holocene. *Annali di Geofisica*, 34: 237-257.
- Pantosti, D., 1997. Modern Approaches in Paleoseismology. En Giardini, D. y Balassanian, S. (Editores): *Historical and prehistorical earthquakes in the Caucasus*, p.147-167, NATO-ASI Series, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht.
- Philip, H. y Megrhaoui, M. 1983. Structural analysis and interpretation of the surface deformation of the El Asnam earthquake of October 10, 1980. *Tectonics* 2(1): 17-49.
- Sagripani, G.L., 2006. Neotectónica y peligro sísmico de la región de Sampacho, departamento Rio Cuarto. Provincia de Córdoba. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Rio Cuarto (inédita), 300 p., Rio Cuarto.
- Sagripani, G.L., Villalba D., Bettiol A.G. y Seitz C., 2009. Sismicidad y paleosismicidad en la región sur de la provincia de Córdoba. Análisis del peligro y riesgo sísmico asociado. *Revista Asociación de Geología Argentina Aplicada a la Ingeniería* 23: 45-53.
- Sagripani, G. L., Schiavo, H. F. Felizzia, J. A. Villalba, D. Aguilera, H. D. Giaccardi, A. D. Y Membrives, J. A., 2011. Fuertes paleosismos de intraplaca y sus retornos vinculados a la Falla las Lagunas, Sierras Pampeanas de Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 68 (1): 53 – 71.
- Schwartz, D., 1988. Geologic characterization of seismic sources: Moving into the 1990s. *Proceedings of the 2º Earthquake Engineering and Soil Dynamics*. 1:42.
- Vita-Finzi, C., 1986. *Recent earth movements*, Academic Press, 226p, Londres.
- Vittori, E., Sylos-Labini, S. y Serva, L., 1991. Paleoseismology: Review of the state of the art. *Tectonophysics*, 193: 9-32.
- Wallace, R.E., 1977. Profiles and ages of young fault scarps, north-central Nevada. *Geological Society of America Bulletin* 88: 1267-1281.
- Wallace, R.E., 1981. Active faults, paleoseismology and earthquake hazards in the Western United States. en: Simpson, D. y Richards, P. (Editores), *Earthquake Prediction*. American Geophysical Union, M. Ewing Series 4: 209-216.
- Wallace, R. (Editor), 1986. *Active Tectonics*. National Academy Press, 266 p, Washington.
- Yeats, R., Sieh, K. y Allen, C., 1997. *The geology of earthquakes*. Oxford University Press., 568p, Oxford.
- Zapata, et al, 2010. Proyecto de investigación: Estudio paleosismológico y sismotectónico de la capacidad sismogeneradora de la falla Pinar. Archivo CENAIIS.

Acerca del autor:

José Fernando Alcaide Orpi: Graduado de Ingeniero Geólogo en el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, 1983. Doctor en Ciencias Geológicas, Universidad de Cantabria, España. Investigador Auxiliar (2001). Cuenta con 33 años de experiencia en la labor profesional. Actualmente labora en el Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAIIS) de Cuba. Ha participado en más de 40 eventos científicos nacionales e internacionales y publicado 55 artículos científicos en revistas nacionales y extranjeras.