

PROPIEDADES MAGNÉTICAS: UN PROXY EN LA IDENTIFICACIÓN DE DEPÓSITOS DE TSUNAMI - COSTA DE JALISCO, PACÍFICO MEXICANO

María Teresa Ramírez Herrera^{1,2*} María Felicidad Bógalo³, Avto Goguitchaichvili⁴, Jan Černý^{5,6}, Néstor Corona⁷

¹ Lab. Universitario de Geofísica Ambiental e Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, México D.F.

² Berkeley Seismological Laboratory, University of California Berkeley, 299 MacCone Hall, Berkeley, CA, USA, Email:

³ Departamento de Física, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Burgos, Burgos, Spain

⁴ Laboratorio Interinstitucional de Magnetismo Natural, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México - Campus Morelia, Michoacán, México

⁵ Department of Geological Sciences, Faculty of Science, Masaryk University, Brno, Czech Republic

⁶ Institute of Geology, Academy of Sciences of the Czech Republic, Prague-Lysolaje, Czech Republic

⁷ Centro de Estudios en Geografía Humana, El Colegio de Michoacán A.C., La Piedad, Mexico.

* email: tramirez@igg.unam.mx, ramirez@berkeley.edu, ramirez@seismo.berkeley.edu

ABSTRACT

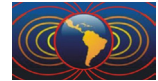
Research on tsunamis using the geological record, may aid to extend the long-term history, and recurrence intervals of large events. The study of tsunami deposits requires the use of a set of proxies, among them magnetic properties, a tool that still needs more exploration. Here we investigate the use of a set of magnetic parameters to study tsunami deposits on the Jalisco coast of Mexico which overlies the subducting Rivera Plate under the North American plate. We present a line of evidence to demonstrate the presence of anomalous sand units at El Tecuán shore on the Jalisco coast that may be the products of tsunamis. Magnetic parameters studied, and in particular SIRM, S-300 and Bcr, show a good correlation with the stratigraphy, allowing identifying and distinguishing different sedimentary units. Although AMS results are not conclusive, the bottom units can be distinguished with this parameter. Further development and use of magnetic parameters in tropical environments where the preservation of tsunami deposits is poor, would aid in their identification.

Keywords: Tsunami deposits, Magnetic studies, Jalisco, Mexican Pacific coast

RESUMEN

La investigación sobre tsunamis utilizando registros geológicos puede ayudar a ampliar la historia y el conocimiento sobre los intervalos de recurrencia a largo plazo de grandes eventos. El estudio de los depósitos de tsunami requiere el uso de un conjunto de herramientas, entre ellas las propiedades magnéticas, una herramienta que todavía necesita más exploración. Aquí investigamos el uso de un conjunto de parámetros magnéticos para estudiar los depósitos de tsunami en la costa de Jalisco de México, en la zona de subducción de la Placa Rivera bajo la placa de América del Norte. Se presenta un conjunto de evidencias para demostrar la presencia de unidades anómalas de arena en la estratigrafía de la costa de El Tecuán en Jalisco que pueden ser los productos de tsunamis. Los parámetros magnéticos estudiados, en particular SIRM, S-300 y Bcr, muestran una buena correlación con la estratigrafía, lo que permite identificar y distinguir diferentes unidades sedimentarias. Aunque los resultados de la AMS no son concluyentes, las unidades inferiores pueden ser distinguidas con este parámetro. Un mayor desarrollo y uso de los parámetros magnéticos en ambientes tropicales, donde la preservación de los depósitos de tsunami es pobre, será de ayuda en su identificación.

Palabras clave: Depósitos de tsunami, Estudios magnéticos, Jalisco, Costa del Pacífico mexicano



Introducción

La determinación de la recurrencia de tsunamis en zonas de actividad sísmica poco frecuente es importante para la evaluación del riesgo de tsunami que precede a grandes sismos en zonas de subducción. La evidencia geológica de tsunamis antiguos puede ayudar a expandir el registro de inundación por tsunamis de cientos y hasta miles de años (*e.g.* Atwater *et al.*, 2005; Dawson, 2000; Dawson and Stewart, 2007; Goto *et al.*, 2015). Esto es de particular importancia en las zonas donde los registros instrumentales e históricos son relativamente cortos o no disponibles. Una de las herramientas en el estudio de los depósitos de tsunamis que se han sido poco exploradas son las propiedades magnéticas (Wassmer *et al.*, 2010; Font *et al.*, 2010, 2013; Goguitchaichvili *et al.*, 2013; Cúven *et al.* 2013; Schneider *et al.*, 2014). Esta herramienta es de particular importancia en zonas tropicales donde la preservación de los depósitos se hace difícil (Ramírez-Herrera *et al.*, 2012, 2014).

La principal fuente de tsunamis a lo largo de la costa del Pacífico de México es el límite de placas entre las placas Cocos y Rivera y la placa de Norte América (Fig.1). La zona cerrada en la interfaz de la placa de Rivera-Norteamérica ha roto en dos etapas en junio de 1932. Un terremoto de 8.2 Ms el 3 de junio, fue seguido por una gran (Ms 7.8) réplica el 22 (Singh *et al.*, 1981, 1985; Astiz y Kanamori, 1984; Pacheco *et al.*, 1997). Ambas rupturas provocaron tsunamis que causaron inundaciones regional y local, respectivamente. El 9 de octubre de 1995, un terremoto de 8.0 Mw provocó un tsunami local, en la costa de Jalisco que inundó la ciudad de La Manzanilla ubicado en la Bahía de Tenacatita.

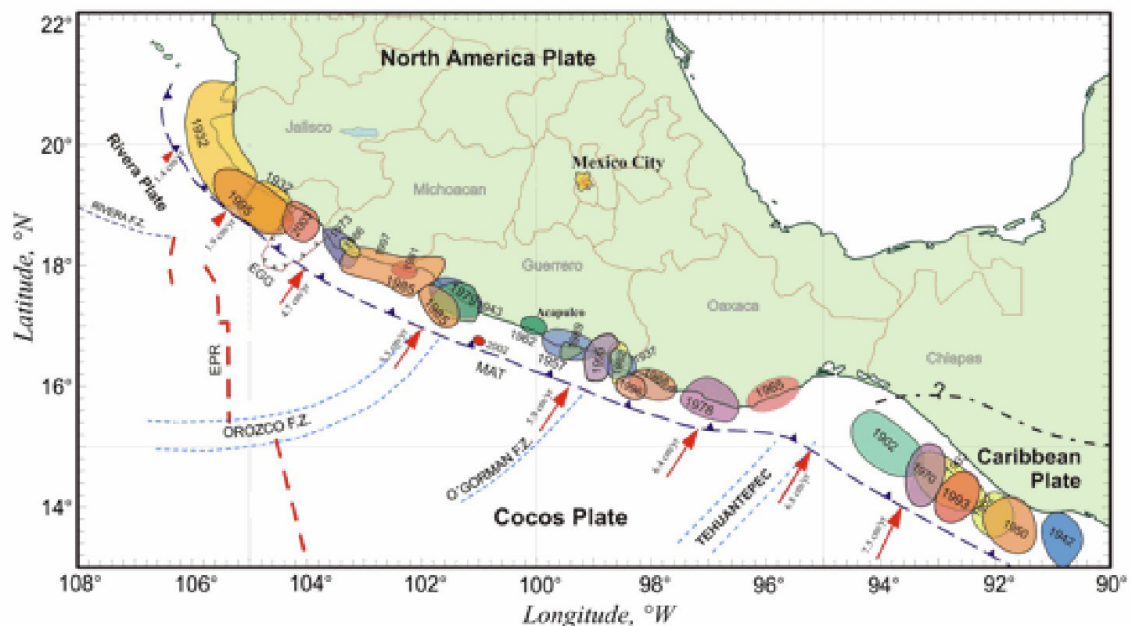


Figura 1. Marco tectónico donde se muestra la ubicación de sismos históricos.

En la costa del Pacífico de México al sur del Golfo de California, los terremotos y los tsunamis se han registrado instrumentalmente y en pocos documentos escritos para los últimos cien años (por ejemplo, Cumming, 1932; Sánchez y Farreras, 1993; NGDC, 2010), pero sus evidencias geológicas se han investigado sólo en unos pocos casos (Ramírez-Herrera *et al.*, 2005, 2007, 2009, 2012, 2014).

El objetivo de este trabajo es presentar la aplicación de las propiedades magnéticas como técnica complementaria en la identificación de depósitos de tsunami. En este estudio se describe a los depósitos remanentes de tsunamis pasados del segmento de la costa del Pacífico de México en el segmento de Jalisco (Fig. 2). Un estudio de las zonas bajas de la costa oeste central de México reveló varios sitios con capas

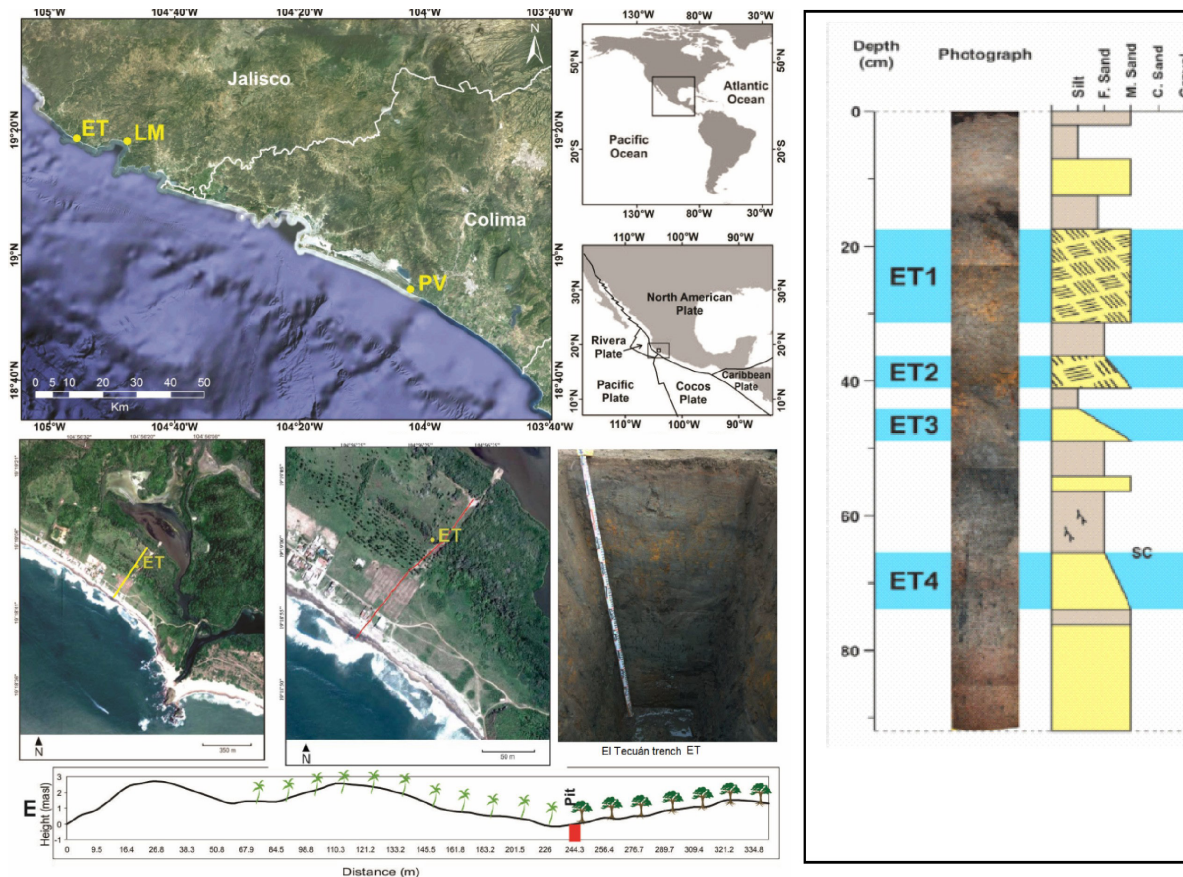
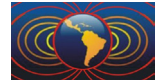


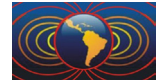
Figura 2. (a). El Tecuán, entorno geomorfológico, la ubicación del perfil topográfico y trinchera. (b). Unidades estratigráficas y probables eventos de tsunami ET1, ET2, ET3 y ET4.

de arena anómalas conservadas dentro de grano fino, en ambientes de depósito de energía más bajos. Aquí presentamos la evidencia geológica y las propiedades magnéticas de los depósitos de tsunamis pasados en los sitios de muestreo en la zona de la laguna y marismas de El Tecuán (Fig.2a).

Método

La elección del lugar por medio de sensores remotos y tres visitas a campo fue seguida por la recolección de sedimentos y el muestreo. El muestreo se realizó en el campo in situ en trincheras, y mediante la recolección de secciones enteras (“monolitos”) para su posterior muestreo de acuerdo al método descrito en Ramirez-Herrera *et al.* (2012). La descripción de la estratigrafía se realizó en las trincheras. Los monolitos y núcleos se limpiaron y submuestrearon en intervalos de 1 cm en las capas de arena e intervalos 2.5-5 cm en las capas de suelo o sedimentos finos.

Las medidas de propiedades magnéticas se realizaron en el Laboratorio de Paleomagnetismo de la Universidad de Burgos e incluyen: susceptibilidad magnética (χ) normalizada por unidad de masa y medida con un puente de susceptibilidad Kappabridge KLY4 (AGICO Ltd), magnetización remanente anhisterética (ARM) y susceptibilidad de la ARM, utilizando magnetómetro criogénico 2G, parámetros de histéresis (B_{cr} , B_c , M_{rs} y M_s) y curvas termomagnéticas (M-T) utilizando una balanza de traslación a campo variable (VFTB). Adicionalmente se realizaron curvas de magnetización remanente isotérmica (IRM) hasta campos máximos de 2 T para muestras seleccionadas utilizando un imanador de pulsos. También se realizaron medidas de la anisotropía de la susceptibilidad magnética (AMS) a temperatura ambiente y bajo campo utilizando un susceptibilímetro MFK1 en el Instituto de Geofísica de la UNAM (México).



Resultados

El sitio de El Tecuán zanja (ET) está 244.3 m tierra adentro a 0 msnm y está separado de la costa por dos crestas de dunas de hasta 2.7 msnm (Fig. 2). La trinchera es de 120 cm de profundidad y termina en la capa freática. El monolito recuperado tiene 92 cm de largo. La estratigrafía consiste en alternancia de suelos arenosos y unidades de arena con contactos basales abruptos: ET1 (17.4 a 31.2 cm de profundidad), ET2 (36.3 a 41 cm), ET3 (44.0 a 48.9 cm), y ET4 (65.1 a 73.9 cm) (Fig. 2b).

En la Figura 3 se muestran algunos de los parámetros magnéticos medidos frente a la profundidad. Se observa una razonablemente buena correlación entre dichos parámetros y la estratigrafía del perfil. Las diferencias observadas entre los perfiles de susceptibilidad y SIRM pueden deberse tanto a la contribución de minerales dia- y paramagnéticos como de minerales antiferromagnéticos, que contribuyen de manera significativa a los valores de χ cuando la concentración de ferrimagnéticos no es elevada (Dekkers, 2007). El parámetro S_{-300} (contribución relativa de minerales antiferromagnéticos respecto a ferrimagnéticos) determinado según Bloemendal *et al.*, 1992, indica la presencia de minerales de alta coercitividad en todo el perfil, siendo esta concentración máxima (valores de S_{-300} mínimos) entre 65 y 80 cm de profundidad, coincidiendo con valores máximos de B_{cr} y de SIRM. Se han modelado las curvas de adquisición de IRM para muestras seleccionadas, siguiendo Kruiver *et al.*, 2001 (Fig. 3). El ajuste estadístico ha mostrado tres componentes de coercitividad diferente en este perfil, pudiéndose observar las diferencias de comportamiento más significativas por encima y por debajo de 63 cm de profundidad. Basándose en las coercitividades, la componente 1 (baja coercitividad) puede identificarse como magnetita, la componente 2 (coercitividad intermedia) podría estar asociada con la presencia de pirrotita, tal y como parecen indicar los experimentos termomagnéticos, y la componente 3 (alta coercitividad) podría estar relacionada con la presencia de hematites.

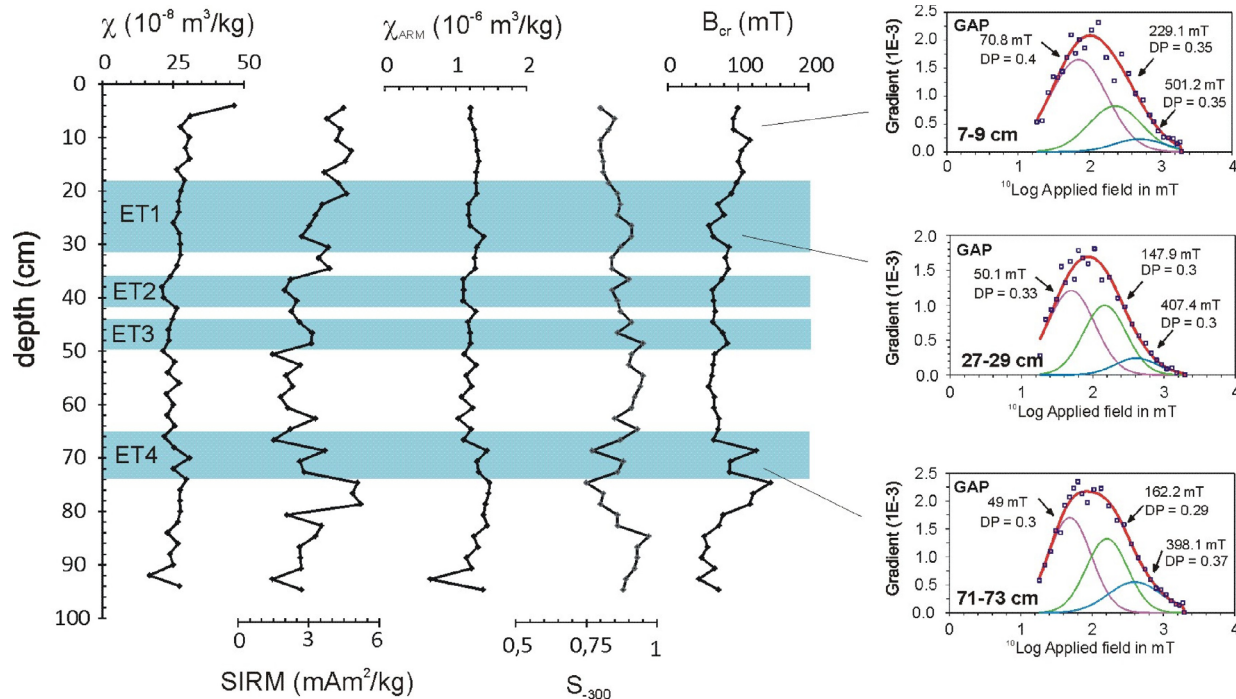


Figura 3. Perfiles de propiedades magnéticas frente a la profundidad. Para las muestras situadas a 7 – 9 cm, 27 – 29 y 71 – 73 cm, se presenta análisis de coercitividades a partir de las curvas de adquisición de IRM, según Kruiver, 2001, indicando también el valor de la coercitividad media y el parámetro de dispersión (DP) (Roberston y France, 1994)

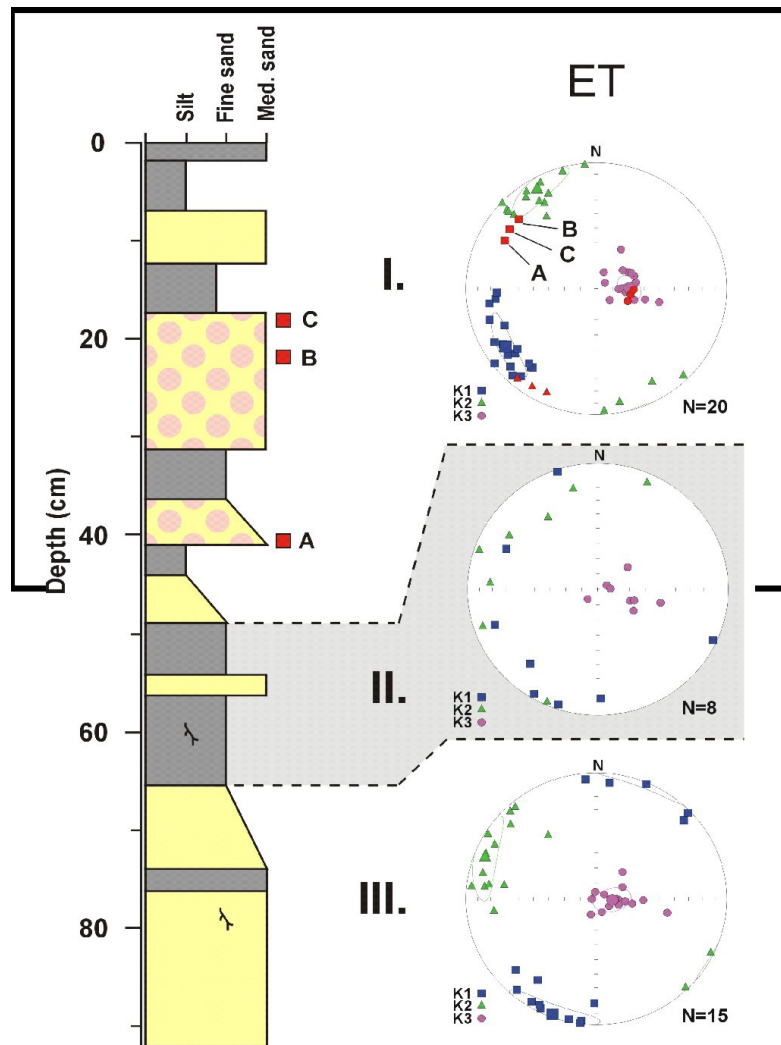
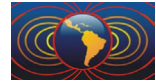
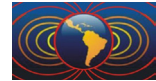


Figura 4. Resultados de la AMS en relación con la estratigrafía. Se distinguen tres fábricas magnéticas (I, II y III). Las muestras de color rojo en la unidad I presentan una desviación significativa en K_1 respecto de la dirección promedio.

El análisis de los resultados de AMS ha permitido separar tres fábricas magnéticas (Fig. 4). La primera fábrica (I), se encuentra en la parte superior del perfil (11 – 49 cm) y la orientación de K_1 es de 236° , aunque tres muestras no se ajustan a esta tendencia. La segunda fábrica (II; 49 – 65 cm) casi no tiene orientación preferente y la dirección de K_1 prácticamente aleatoria. La tercera fábrica (III; 65 – 93 cm) tiene una orientación de K_1 de 200° .

Discusión y Conclusiones

Cuatro unidades de arena fueron identificadas en el sitio El Tecuán y parecen estar relacionadas con diferentes eventos de tsunami: ET1 (17.4 a 31.2 cm de profundidad), ET2 (36.3 a 41 cm), ET3 (44.0 a 48.9 cm), y ET4 (65.1 a 73.9 cm). ET1 es una unidad de arena que recubre un suelo enterrado con un contacto basal abrupto. Esta unidad cuenta con varias características comúnmente consideradas de diagnóstico de un depósito de tsunami. En primer lugar, la presencia de un contacto basal agudo sugiere una entrada repentina de sedimento. La presencia de gradación normal, así como de gradación inversa de las subunidades en ET1 pueden ser explicados por un origen tsunamigénico (Dawson *et al.*, 1988, Minoura *et al.*, 2000, Jaffe y Gelfenbaum, 2007, Jaffe *et al.*, 2012). Las unidades de arena ET2, ET3 y ET4 también cumplen múltiples criterios para depósitos de tsunami. Todas ellas con finos hacia arriba y superpuestas a unidades de suelos, con contactos basales abruptos. También tienden a ser mejor clasificadas que las unidades de suelos intercaladas.



Los parámetros magnéticos estudiados, y en particular SIRM, S_{-300} y B_{cr} , muestran una buena correlación con la estratigrafía, permitiendo identificar y distinguir las diferentes unidades sedimentarias. Estos parámetros muestran cambios significativos en su comportamiento en la parte inferior de las unidades correspondientes a los eventos de tsunamis, sobre todo en los eventos ET1, ET3 y ET4. Aunque la magnetita es el principal portador magnético, se han identificado dos fases magnéticas de coercitividades superiores, hematites (alta coercitividad) y posiblemente pirrotita (coercitividad intermedia). En la unidad ET4 la contribución de estos minerales magnéticamente duros es máxima, llegando incluso a contribuir a la magnetización tanto como la magnetita.

Los resultados de AMS muestran cambios significativos por debajo de la deposición de la capa relacionada con el evento ET4 y por encima del evento ET3. No es posible, sin embargo, hacer distinciones entre las capas depositadas durante los eventos ET1, ET2 y ET3 debido a su carácter similar en lo que a las fábricas de AMS se refiere. Las diferencias observadas en tres muestras relacionadas con los eventos ET1 y ET2 podrían estar relacionadas con una deposición en un ambiente de mayor energía, puesto que el flujo tiende a reorientar la dirección de K_1 en dirección perpendicular a la dirección del flujo (e.g. Tarling and Hrouda, 1993).

Los datos históricos sobre tsunamis en la costa de Jalisco indican que una serie de tsunamis han ocurrido en el intervalo de tiempo antes del evento de 1932, en particular los eventos de 1563, 1816 y 1818. Sin embargo, las edades obtenidas nos impiden asignar con certeza absoluta la edad de los depósitos de tsunami observados y correlacionarlos con los tsunamis registrados históricamente.

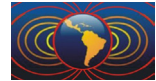
Nuestros datos representan una contribución a los estudios de evidencia geológica terrestre de los tsunamis históricos y prehistóricos originados en la costa del Pacífico de México. Por otra parte, este trabajo reconoce el gran valor de un enfoque con un proxy poco utilizado, las propiedades magnéticas para identificar depósitos de tsunami en ambientes costeros tropicales, donde los enfoques convencionales han demostrado ser más difíciles de aplicar.

Agradecimientos

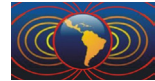
Ramírez-Herrera reconoce el apoyo financiero a este proyecto de investigación por la SEP-CONACYT -129456 y PASPA-UNAM-2015 para su estancia sabática en *Berkeley Seismological Laboratory, University of California Berkeley*. M.F. Bógalo agradece la ayuda económica de los proyectos CGL2012-38481 y CGL2012-32149 de la Dirección General de Investigación Científica y Técnica, Ministerio de Economía y Competitividad del gobierno español y los Fondos Regionales Europeos. J. Černý agradece la ayuda económica del Gobierno de México - Secretaría de Relaciones Exteriores de México y la ayuda institucional asignada por RVO: 67985831. A. Goguitchaichvili agradece la ayuda económica de la UNAM PAPIIT IN105214.

Referencias

- Astiz, L., Kanamori, H., 1984. An earthquake doublet in Ometepepec, Guerrero, Mexico. *Phys Earth Planetary Int* 34, 24–45.
- Atwater, B.F., Musumi-Rokkaku, S., Satake, K., Tsuji, Y., Ueda, K., Yamaguchi, D.K., 2005. The orphan tsunami of 1700—Japanese clues to a parent earthquake in North America. *U.S. Geological Survey Professional Paper, 1707*, 133 p.
- Bloemendal, J., King, J. W., Hall, F. R., Doh, S. J., 1992. Rock magnetism of Late Neogene and Pleistocene deep-sea sediments: relationship to sediment source, diagenetic processes and sediment lithology. *Journal of Geophysical Research*, 97 (B4), p. 4361–4375.
- Cumming J. L. 1933. Los terremotos de junio de 1932 en los estados de Colima y Jalisco. *Universidad de México*, 31-32, 68-104.



- Cuven, S., Paris, R., Falvard, S., Miot-Noirault, E., Benbakkar, M., Schneider, J.-L., Billy, I., 2013, High-resolution analysis of a tsunami deposit: Case-study from the 1755 Lisbon tsunami in southwestern Spain. *Marine Geology*, 337, 98–111. doi:10.1016/j.margeo.2013.02.002
- Dawson, A., Long, D., Smith, D. E., 1988. The Storegga slides. Evidence from eastern Scotland for a possible tsunami. *Marine Geology* 82, 271–276.
- Dawson, A. G., Shi, S., 2000. Tsunami Deposits. *Pure and Applied Geophysics*, 157(6), 875-897.
- Dawson A. G. and Stewart I., 2007. Tsunami deposits in the geological record. *Sedimentary Geology*, 200, 3-4, 166-183.
- Dekkers, M., 2007. Magnetic proxy parameters. In: Enciclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism, Springer 1054 pp.
- Font, E., Nascimento, C., Omira, R., Baptista, M. A., Silva, P. F., 2010. Identification of tsunami-induced deposits using numerical modeling and rock magnetism techniques: A study case of the 1755 Lisbon tsunami in Algarve, Portugal. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 182, 187–198. doi:10.1016/j.pepi.2010.08.007
- Font, E., Veiga-Pires, C., Pozo, M., Nave, S., Costas, S., Ruiz Munoz, F., Abad, M., Simoes, N., Duarte, S., Rodriguez-Vidal, J., 2013. Benchmarks and sediment source(s) of the 1755 Lisbon tsunami deposit at Boca do Rio Estuary. *Marine Geology*, 343, 1–14. doi:10.1016/j.margeo.2013.06.008
- Gogutchachvili, A., Ramirez-Herrera, M. T., Calvo-Rathert, M., Aguilar Reyes, B., Carrancho, A., Caballero, C., Bautista, F., Morales Contreras, J., 2013. Magnetic fingerprint of tsunami-induced deposits in the Ixtapa–Zihuatanejo Area, Western Mexico. *International Geology Review*, 55, 1462–1470.
- Goto T., Satake K., Sugai T., Ishibe T., Harada T., Murotani S., 2015. Historical tsunami and storm deposits during the last five centuries on the Sanriku coast, Japan. *Marine Geology*, 367, 105-117, <http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2015.05.009>.
- Jaffe, B. E., Gelfenbaum, G., 2007. A simple model for calculating tsunami flow speed from tsunami deposits. *Sedimentary Geology*, 200, 347–361.
- Jaffe, B. E., Goto, K., Sugawara, D., Richmond, B. M., Fujino, S., Nishimura, Y., 2012. Flow speed estimated by inverse modeling of sandy tsunami deposits: results from the 11 March 2011 tsunami on the coastal plain near the Sendai Airport, Honshu, Japan. *Sedimentary Geology*, 282, 90-109.
- Kruiver, P. P., Dekkers, M. J., Heslop, D., 2001. Quantification of magnetic coercivity components by the analysis of acquisition curves of isothermal remanent magnetization. *Earth and Planetary Science Letters*, 189, 269 – 276.
- Minoura, K., Imamura, F., Kuran, U., Nakamura, T., Papadopoulos, G. A., Takahashi T., A. C. Yalciner, 2000. Discovery of Minoan tsunami deposits. *Geology*, 28, 59-62.
- Pacheco, J. F., Singh, S. K., Dominguez, J., Hurtado, A., Quintanar, L., Jimenez, Z., Yamamoto, J., Gutierrez, C., Santoyo, M., Bandy, W., Guzman, M., Kostoglodov V., 1997. The October 9, 1995 Colima–Jalisco, Mexico, earthquake (M_w 8): An aftershock study and a comparison of this earthquake with those of 1932. *Geophys. Res. Lett.*, 24, 2223–2226.
- Ramírez-Herrera, M. T., Cundy A., Kostoglodov, V., 2005. Evidence of Prehistoric Earthquakes and Tsunamis during the last 5000 years along the Guerrero Seismic Gap, Mexico. Proceedings of the XV CNIS Mexican Society of Seismic Engineering I-07, 1-17.
- Ramírez-Herrera, M. T., Cundy, A., Kostoglodov, V., Carranza-Edwards A., Morales E., Metcalfe S., 2007. Sedimentary record of late Holocene relative sea-level change and tectonic deformation from the Guerrero Seismic Gap, Mexican Pacific Coast. *The Holocene*, 17, 1211-1220. doi: 10.1177/0959683607085127
- Ramírez-Herrera, M. T., Cundy, A., Kostoglodov, V., Ortiz M., 2009. Late Holocene tectonic land-level changes and tsunamis at Mitla lagoon, Guerrero, México. *Geofísica Internacional*, 48, 195-209.



- Ramirez-Herrera, M. T., Kostoglodov, V., Urrutia-Fucugauchi, J., 2010. Overview of Recent Tectonic Deformation in the Mexican Subduction Zone. *Pure and Applied Geophysics*, 1–19. Doi: 10.1007/s00024-010-0205-y
- Ramirez-Herrera, M. T., 2011. Environmental evidence of coastal level changes along the Pacific coast of Mexico: earthquakes and tsunamis. *Rev. Geogr. Norte Gd* 49, 99-124.
- Ramírez-Herrera, M.-T., Lagos, M., Huthchinson, I., Kostoglodov, V., Machain, M. L., Caballero, M., Goguitchaichvili, A., Aguilar, B., Chagué-Goff, C., Goff, J., Ruiz-Fernandez, A.-C., Ortiz, M., Nava, H., Bautista, F., Lopez, G.I., Quintana, P., 2012. Extreme wave deposits on the Pacific coast of Mexico: Tsunamis or storms? — A multi-proxy approach. *Geomorphology* 139–140(0), 360-371. doi:10.1016/j.geomorph.2011.11.002
- Roberston, D. J., France, D. E., 1994. Discrimination of remanence-carrying minerals in mixtures, using isothermal remanent magnetization acquisition curves. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 82, 223–234.
- Sánchez, A. J., Farreras, S.F. 1993. Catálogo de tsunamis (maremotos) en la costa occidental de México. Boulder, Colorado. National Geophysical Data Center; 79 p.
- Schneider, J.-L., Chagué-Goff, C., Bouchez, J.-L., Goff, J., Sugawara, D., Goto, K., Jaffe, B., Richmond, B., 2014. Using magnetic fabric to reconstruct the dynamics of tsunami deposition on the Sendai Plain, Japan – The 2011 Tohoku-oki tsunami. *Marine Geology*, 358, 89–106.
- Singh, S. K., Havskov, J., Astiz, L., 1981. Seismic gaps and recurrence periods of large large earthquakes along the Mexican subduction zone. *Bulletin of the Seismology Society of America*, 71, 827-843.
- Singh, S. K., Ponce, L., Nishenko, S. P. ,1985. The great Jalisco, Mexico, earthquakes of 1932: subduction of the Rivera plate. *Bulletin of the Seismology Society of America*, 75 (5), 1301–1313.
- Tarling, D. H., Hrouda, F. 1993. The Magnetic Anisotropy of Rocks. – Champan and Hall, London.
- Wassmer, P., Schneider, J.-L., Fonfrère, A.-V., Lavigne, F., Paris, R., Gomez, C., 2010, Use of anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) in the study of tsunami deposits: Application to the 2004 deposits on the eastern coast of Banda Aceh, North Sumatra, Indonesia. *Marine Geology*, 275, 255–272. doi:10.1016/j.margeo.2010.06.007