



ORIGEN, HIDRODINÁMICA Y VARIACIÓN LATERAL EN SEDIMENTOS DE TSUNAMI POR AMS, COSTA MEXICANA DEL PACÍFICO

Jan Černý^{1,2}, María-Teresa Ramírez-Herrera^{3,4}, María Felicidad Bógalo⁵, Avto Goguitchaichvili^{4,6},
Rocío Castillo-Aja⁷, Juan Morales^{4,6}

¹ Department of Geological Sciences, Faculty of Science, Masaryk University, Brno, Czech Republic

² Institute of Geology, Academy of Sciences of the Czech Republic, Prague-Lysolaje, Czech Republic

³ Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, México City, México

⁴ Laboratorio Universitario de Geofísica Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México - Campus Morelia, Michoacán, México

⁵ Departamento de Física, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Burgos, Burgos, Spain

⁶ Laboratorio Interinstitucional De Magnetismo Natural, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México - Campus Morelia, Michoacán, México

⁷ Posgrado en Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, México City, México

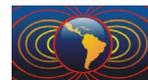
ABSTRACT

Subduction zone earthquakes can generate abrupt vertical movement of the seafloor or submarine landslide. Both can produce a tsunami wave that can hit coastal areas. Such waves transport material which is usually deposited on flat plains and in topographic depressions on the coast. From this point of view, lagoons are ideal environments where tsunami deposits can be preserved. The studied sites were situated in lagoons on the active Mexican continental margin, where both storm and tsunami inundations can occur. The potential of magnetic proxies in marine inundation deposits studies is still under consideration, and there are some methodological difficulties. Our most recent results showed that: 1) magnetic studies may be useful to determine what material was the main source of magnetic minerals in sediments; 2) AMS can help to distinguish different hydrodynamic environments related to different layers; 3) primary sedimentary fabric in fine-grained lagoon sediments such clays may have developed lateral imbrication; 4) the lateral variability of AMS parameters can be significant and a test of horizontal variability in sedimentary beds should be performed before final interpretations.

Keywords: Anisotropy of magnetic susceptibility, Rock-magnetic properties, Tsunami, Mexican Pacific coast

RESUMEN

Los terremotos en zonas de subducción pueden generar movimientos abruptos verticales del nivel del mar o deslizamientos submarinos. Ambos pueden producir una ola de tsunami, afectando a zonas costeras. Estas olas transportan material que normalmente se deposita en llanuras y en depresiones topográficas en la costa. Desde este punto de vista, las lagunas son ambientes ideales donde los depósitos de tsunamis pueden ser preservados. Los sitios estudiados se encuentran en lagunas del margen continental activo mexicano, donde pueden haber ocurrido tanto tormentas como tsunamis. Actualmente, el posible potencial que supone la utilización de parámetros magnéticos en los estudios de los depósitos de inundación marina sigue en estudio debido a ciertas dificultades metodológicas. Nuestros resultados más recientes mostraron que: 1) los estudios magnéticos pueden ser útiles para determinar qué material es la principal fuente de minerales magnéticos en los sedimentos; 2) La AMS puede ayudar a distinguir los diferentes ambientes hidrodinámicos relacionados con diferentes capas; 3) la fábrica sedimentaria primaria en los sedimentos de grano fino de la laguna tales



como arcillas puede haber desarrollado imbricación lateral; 4) la variabilidad lateral de los parámetros de AMS puede ser significativa y una prueba de la variabilidad horizontal en capas sedimentarias debería realizarse antes de emitir interpretaciones finales.

Palabras clave: Anisotropía de la susceptibilidad magnética, Propiedades magnéticas de rocas, Tsunami, costa pacífica mexicana.

1. Introducción

El área de estudio se encuentra en el margen continental activo mexicano, donde tienen lugar tanto tormentas como tsunamis. Mientras que las tormentas tienen un origen climático, las inundaciones debidas a tsunamis están relacionadas con deslizamientos submarinos y/o eventos sísmicos. Los tsunamis provocados por terremotos en esta área están relacionados con la zona activa donde la placa de Cocos y la microplaca Rivera subduce bajo la placa de América del Norte. Durante los últimos años, varios trabajos se han ocupado de estudiar las características de la zona de subducción, como la sismicidad y tectónica a lo largo del margen activo de México y el potencial de esta zona para producir tsunamis provocados por terremotos (por ejemplo Manea *et al.*, 2013; Ferrari *et al.*, 2012; Ramírez-Herrera y Urrutia-Fucugauchi, 1999; Núñez-Cornú *et al.*, 2002) sin embargo, varias preguntas siguen sin respuesta.

Los estudios magnéticos se han convertido en una herramienta importante para la identificación de los depósitos de tsunami. Los primeros intentos de incorporar los estudios magnéticos como indicadores en los estudios de los depósitos de tsunami fueron realizados recientemente (Fuentes *et al.* 2010; Wassmer *et al.*, 2010). Desde entonces, los indicadores magnéticos, como la susceptibilidad magnética (MS) o la anisotropía de susceptibilidad magnética (AMS) han supuesto una herramienta innovadora utilizada en los estudios de depósitos de tsunami (por ejemplo Cuven *et al.*, 2013; Fuente *et al.*, 2013; Schneider *et al.*, 2014.; Ramírez-Herrera *et al.*, 2012, 2014). Sin embargo, el potencial de estos indicadores magnéticos en este tipo de trabajos sigue en estudio. Por lo tanto, proporcionar nuevos datos magnéticos de depósitos de inundación contribuirá a un mejor conocimiento de la utilidad de este tipo de estudios con el fin de caracterizar las propiedades internas de los sedimentos.

2. Metodología y muestreo

En el muestreo se tomaron muestras orientadas de sedimentos de la laguna en una zanja excavada en el pantano Las Salinas, sitio 004, en la costa de Jalisco, México. La estratigrafía costera en este sitio se compone de cuatro unidades de arena en la parte superior, mientras que la parte inferior consta de dos unidades de arcilla. En adelante, nos referiremos a estas unidades como la unidad arenosa superior y la unidad arcillosa inferior para la comparación general con el análisis de las propiedades magnéticas. La unidad arenosa superior tiene un contacto basal abrupto a aproximadamente 18 cm de profundidad.

En la localidad Las Salinas 004, se recogieron muestras para estudios magnéticos de dos maneras: 1) Las muestras para el análisis de AMS se tomaron en cuatro horizontes de profundidad: 7-9 cm, 13-15 cm, 21-23 cm y 43-45 cm; se recogiendo 8 muestras de cada intervalo de profundidad para verificar la variabilidad lateral. 2) A lo largo de un perfil vertical continuo cada 2 cm, a partir de 1 cm por debajo de la superficie y hasta una profundidad de 45 cm (22 muestras en total). Estas muestras se utilizaron para los otros estudios detallados de magnetismo de rocas, que se describirán a continuación. Todas las mediciones de AMS se realizaron al Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México y las curvas termomagnéticas en el laboratorio de Paleomagnetismo de la Universidad de Burgos, utilizando en ambos casos el dispositivo KLY-2 Kappabridge.

Las direcciones de susceptibilidad principales K_1 , K_2 y K_3 corresponden a la máxima, intermedia y mínima direcciones de susceptibilidad, respectivamente. En base a estas direcciones principales, se calcularon



los siguientes parámetros de AMS: parámetro de forma T (Jelínek 1981); grado de anisotropía P (Nagata 1961); susceptibilidad magnética media K_m ; factor de forma q (nombrado originalmente como el cociente de anisotropía azimutal; Granar 1958); lineación magnética L (Khan 1962) y foliación magnética F (Khan 1962). Los datos de AMS fueron analizados utilizando el software Anisoft 4.1. Se ha utilizado una tipografía matemática correcta para distinguir entre escalares (*cursiva*) y vectores (**negrita**) a lo largo de este artículo para evitar malentendidos.

3. Resultados

El análisis de la dependencia de la susceptibilidad magnética con la temperatura se realizó en dos muestras representativas de la unidad superior e inferior (Figura 1). Ambas curvas muestran un punto de inflexión entre 575 y 585 ° C. Por otra parte, la curva de capa inferior muestra el aumento de la susceptibilidad magnética en el comienzo, seguido por una caída gradual entre 270 y 530 ° C y luego una disminución brusca con un punto de inflexión entre 575 y 585 ° C.

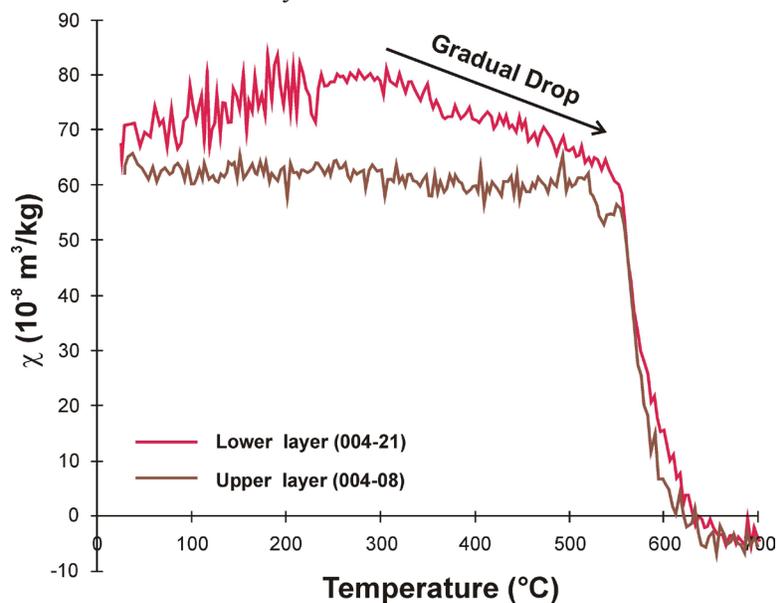


Figura 1. Curvas de calentamiento de la susceptibilidad magnética *versus* temperatura para muestras representativas de los horizontes superior e inferior.

La fábrica magnética de la parte superior del perfil (I; muestreada en los horizontes situados a 7-9 cm y 13-15 cm) muestra direcciones medias de \mathbf{K}_1 y \mathbf{K}_2 subhorizontales, mientras que la media de \mathbf{K}_3 está orientada verticalmente. La fábrica I muestra más dispersión en comparación con los resultados de AMS de la parte inferior del perfil (II; muestreada en los horizontes situados a 21-23 cm y 43-45 cm). La dirección media de \mathbf{K}_1 en el caso de la fábrica magnética II está orientada según 217 ° en azimut, pero la dirección media de \mathbf{K}_3 está inclinada respecto la línea vertical alrededor de 35 ° y \mathbf{K}_2 aproximadamente el mismo ángulo respecto el plano horizontal. La susceptibilidad magnética media de las muestras relacionadas con la fábrica magnética I (cuadrados azules y verdes; Fig. 2) es menor que la susceptibilidad magnética media de las muestras correspondientes a la fábrica magnética II (cuadrados rojos y amarillos; Fig. 2).

Debido a las observaciones de la variabilidad en la dirección horizontal, i. e., a través del perfil, la AMS se midió en muestras de cuatro horizontes. Los límites para los valores de los parámetros máximo y mínimo, así como de sus desviaciones estándar se establecieron por separado para cada horizonte. El rango de los valores de los parámetros se ha establecido a partir de los cambios en las propiedades horizontales de sedimento (Fig. 3).

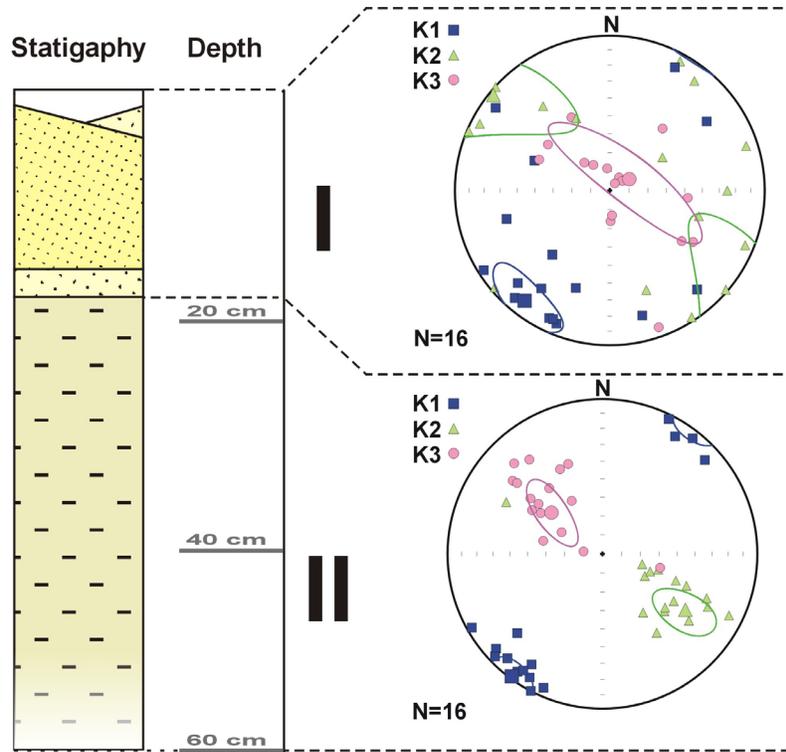
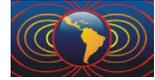


Figura 2. Resultados de AMS con relación a la estratigrafía: I – horizonte superior; II – horizonte inferior. Direcciones principales (K_1 , K_2 , K_3) en coordenadas geográficas representadas en una proyección de igual área en el hemisferio inferior.

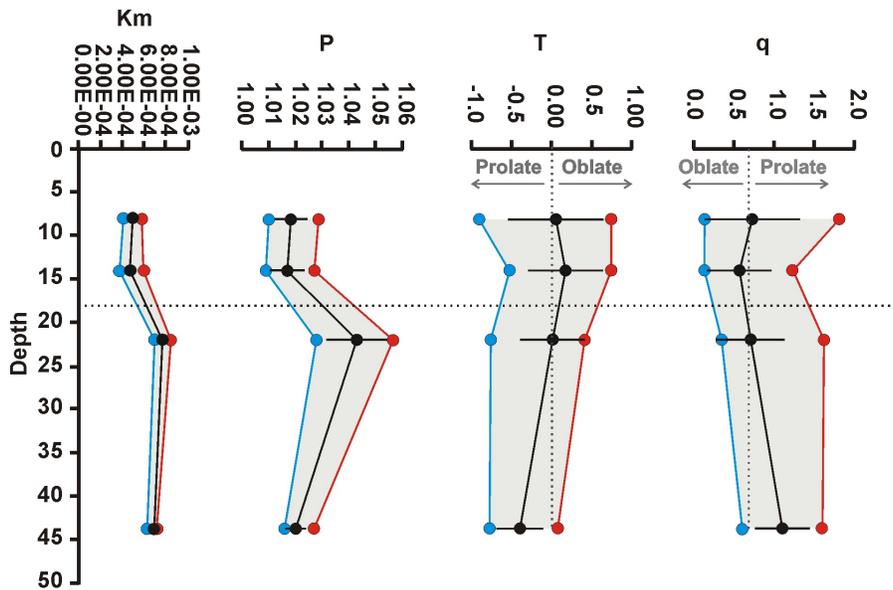
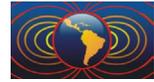


Figura 3. Variabilidad horizontal de parámetros basada en 8 muestras para cada intervalo de muestreo frente a la profundidad en el perfil de Las Salinas 004. Se representan los valores máximos (rojo), mínimo (azul) y medio (negro) de los parámetros individuales así como de la desviación estándar (líneas horizontales negras). Km – susceptibilidad magnética en unidades SI; P – grado de anisotropía; T – parámetro de forma; q – factor de forma; L – lineación magnética; F – foliación magnética.



4. Discusión y conclusiones

Las curvas termomagnéticas (χ -T), las cuales permitieron determinar los principales portadores de la susceptibilidad magnética, muestran diferencias entre las dos unidades. Las temperaturas entre 575 y 585 °C corresponden a punto de Curie de la magnetita, sin embargo, temperaturas de Curie más bajas pueden corresponder a varios minerales con contenidos variables de Ti, como titanomagnetita, titanomaghemita o titanohematites. La temperatura de Curie de los miembros de las series de titanomagnetita o titanohematites depende de la proporción de Ti y Fe y puede variar ampliamente (Nagata 1961). En la unidad inferior, la extensa gama de temperaturas de Curie entre 350 °C y 585 °C en el diagrama ternario del sistema FeO–TiO₂–Fe₂O₃ (Figura 4-A; Carmichael 1982) muestra que la composición de óxidos de hierro en esta unidad está probablemente relacionada con rocas ácidas y/o extrusivas intermedias (Fig. 4-B; Piper 1987, Cornell y Schwertmann, 2003). Por otra parte, el carácter de la curva termomagnética, donde se puede observar una caída gradual, posiblemente seguido de una disminución brusca (Fig. 1), es típico de material volcánico con los granos finos de titanomagnetita, siendo resultado de un fraccionamiento difusivo (Zhou *et al.*, 2000).

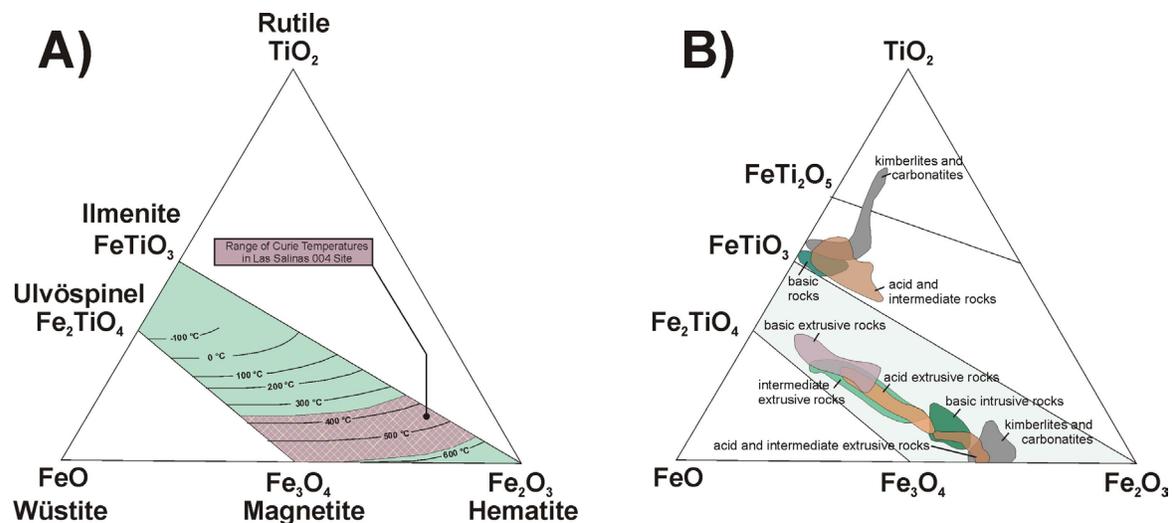
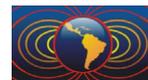


Figura 4. Diagrama ternario del sistema FeO–TiO₂–Fe₂O₃: A) Variación de la temperatura de Curie (T_c) en las series de titanomagnetita y titanohematita según Carmichael (1982; modificado); B). Composición de titanomagnetita y titanohematita en varios tipos de rocas ígneas (después de Piper, 1987; Cornell y Schwertmann, 2003; modificado)

La variabilidad horizontal de parámetros AMS en capas sedimentarias es normalmente subestimado. De hecho, puede ser muy bajo en algunos sedimentos. Sin embargo, sin una prueba de capas/horizontes individuales no se puede decir si afecta significativamente a los resultados o no. La única manera de saberlo es probarlo mediante la recopilación de varias muestras en el mismo horizonte. Esta prueba es aún más conveniente cuando se espera una alta variabilidad lateral como en el caso de los depósitos de inundación marinos. Los resultados de la localidad de Las Salinas muestran una gran gama de los valores de los parámetros T y q y los valores medidos representan tanto forma del elipsoide oblato como prolato (Fig. 3). Esto implica que podemos obtener aleatoriamente valores de los parámetros que representan la forma oblata o prolata del elipsoide de AMS sin una evaluación estadística de la forma en cada horizonte. Tal y como nuestros resultados sugieren, debe realizarse una prueba de la variabilidad horizontal en capas sedimentarias antes de interpretaciones finales.

Ha sido posible distinguir dos fábricas de AMS en la localidad de Las Salinas 004. La fábrica magnética I tiene casi la misma orientación de la dirección media \mathbf{K}_1 (Fig. 2), pero una tendencia significativa hacia



la reorientación a la posición perpendicular, además un mayor grado de dispersión de K_2 y K_3 sugiere que esta unidad se depositó en un ambiente de mayor energía que la unidad inferior (por ejemplo Tarling y Hrouda 1993; Ellwood y Ledbetter 1977; Taira y Scholle 1979). Esta relación entre la dirección del flujo y la dirección K_1 ha sido mostrada también en estudios recientes de depósitos de tsunami (por ejemplo Wassmer *et al.*, 2010; Cuvén *et al.*, 2013; Schneider *et al.*, 2014). La fábrica magnética II refleja una capa con desarrollada imbricación lateral. Los procesos sedimentarios, los cuales podrían estar relacionados con el origen de la fábrica con imbricación lateral en arcilla, han sido descritos por Vilas *et al.* (1999). Por otra parte, la sedimentología indica que la unidad se depositó en un ambiente de baja energía, no relacionado con un evento de tsunami en este caso.

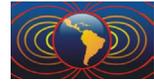
Los resultados de las Salinas mostraron que los estudios magnéticos pueden ayudar a entender que: 1) El material de procedencia volcánica fue una importante fuente de minerales magnéticos en la capa arcillosa inferior. 2) La fábrica magnética relacionada con la unidad inferior sugiere que esta unidad ha desarrollado imbricación lateral. Aunque tales estructuras han sido poco estudiada, la sedimentología indica que la unidad se depositó en un ambiente de baja energía no relacionado con un evento de tsunami. 3) La evaluación estadística de las direcciones principales de susceptibilidad sugiere que la unidad superior se depositó en un ambiente de mayor energía que la unidad inferior. 4) Como se indica por los resultados de Las Salinas, la variabilidad lateral de los parámetros de AMS a escala de afloramiento puede ser muy amplia. El uso de un único valor de ciertos parámetros AMS sin evaluación estadística no puede considerarse representativo de una cierta profundidad y puede dar resultados aleatorios y falsos. Esto implica que la variabilidad puede ser a veces muy significativa, y antes de emitir interpretaciones finales, debe realizarse un test de la variabilidad horizontal en las capas sedimentarias. 5) A pesar de las incertidumbres en los datos, creemos que el origen de la unidad superior en el sitio investigado está muy probablemente relacionado con el tercer evento tsunami de junio de 1932.

Agradecimientos

J. Černý agradece la ayuda económica del Gobierno de México - Secretaria de Relaciones Exteriores de México y la ayuda institucional asignada por RVO:67985831. M. T. Ramírez-Herrera agradece la ayuda económica del SEP-CONACYT beca de investigación 129456. M.F. Bógalo agradece la ayuda económica de los proyectos CGL2012-38481 y CGL2012-32149 of la Dirección General de Investigación Científica y Técnica, Ministerio de Economía y Competitividad del gobierno español y los Fondos Regionales Europeos. A. Goguitchaichvili agradece la ayuda económica de la UNAM PAPIIT IN105214. R. Castillo-Aja agradece a su beca de doctorado otorgada por el CONACYT.

Referencias

- Carmichael, R. S., 1982. Handbook of Physical Properties of Rocks, Volume II: CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 345 p.
- Cornell, R. M., Schwertmann, U., 2003. The Iron Oxides, Second edition. Weinheim: Wiley VCH, 664 p.
- Cuvén, S., Paris, R., Falvard, S., Miot-Noirault, E., Benbakkar, M., Schneider, J.-L., and 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
- Ellwood, B. B., and Ledbetter, M. T., 1977, Antarctic bottom water fluctuations in the Vema Channel: effects of velocity changes on particle alignment and size. *Earth and Planetary Science Letters*, 35, 189–198.
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V. C., and Manea, M., 2012. The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics*, 522–523, 122–149.
- Font, E., Nascimento, C., Omira, R., Baptista, M. A., and 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 Muñoz, F., Abad, M., Simões, N., Duarte, S., Rodríguez-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
- Granar, L., 1958, Magnetic measurements on Swedish varved sediments. *Arkiv för Geofysik*, 3, 1–40.
- Jelinek, V., 1981, Characterization of magnetic fabric of rocks. *Tectonophysics*, 79, 563–567.
- Khan, M. A., 1962. The anisotropy of magnetic susceptibility of some igneous and metamorphic rocks. *Journal of Geophysical Research*, 67, 2873–2885.
- Manea, V. C., Manea, M., and Ferrari, L., 2013. A geodynamical perspective on the subduction of Cocos and Rivera plates beneath Mexico and Central America. *Tectonophysics*, 609, 56–81.
- Nagata, T., 1961, Rock Magnetism, 2nd edition: Tokyo, Maruzen Company Ltd., 350 p.
- Núñez-Cornú, F., Rutz, L., Nava, F., Reyes-Dávila, G., Suárez-Plascencia, C., 2002. Characteristics of seismicity in the coast and north of Jalisco Block, Mexico. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 132, 141–155. [http://dx.doi.org/10.1016/S0031-9201\(02\)00049-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0031-9201(02)00049-3).
- Piper, J. D. A., 1987. Paleomagnetism and the continental crust, Wiley, New York – Toronto, p. 434.
- Ramírez-Herrera, M. T., Urrutia-Fucugauchi, J., 1999. Morphotectonic zones along the coast of the Pacific continental margin, southern Mexico. *Geomorphology*, 28, 237–250.
- Ramírez-Herrera, M. T., Corona, N., Lagos, M., Černý, J., Gogichaishvili, A., Goff, J., Chagué-Goff, C., Machain, M. L., Zawadzki, A., Jacobsen, G., Carranza-Edwards, A., Lozano, S., Blecher, L., 2014. Unearthing earthquakes and their tsunamis using multiple proxies: the 22 June 1932 event and a probable fourteenth-century predecessor on the Pacific coast of Mexico. *International Geology Review*, 56, 1584–1601.
- Ramírez-Herrera, M. T., Lagos, M., Hutchinson, I., Kostoglodov, V., Machain, M. L., Caballero, M., Goguitchaichvili, A., Aguilar, B., Chagué-Goff, C., Goff, J., Ruiz-Fernández, 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, 360–371. doi:10.1016/j.geomorph.2011.11.002
- Schneider, J.-L., Chagué-Goff, C., Bouchez, J.-L., Goff, J., Sugawara, D., Goto, K., Jaffé, B., Richmond, B., 2014., Using magnetic fabric to reconstruct the dynamics of tsunami deposition on the Sendai Plain, Japan – The 2011 Tohokuoki tsunami. *Marine Geology*, 358, 89–106.
- Taira, A., and Scholle, P. A., 1979, Deposition of reseedimented sandstone beds in the Pico Formation, Ventura Basin, California, as interpreted from magnetic fabric measurements. *Geological Society of America Bulletin*, 90, 952–962.
- Tarling, D.H., and Hrouda, F., 1993, The Magnetic Anisotropy of Rocks: London, Chapman and Hall, 217 p.
- Vilas, F., Arche, A., Ferrero, M., and Isla, F., 1999, Subantarctic macrotidal flats, cheniers and beaches in San Sebastian Bay, Tierra Del Fuego, Argentina. *Marine Geology*, 160, 301–326.
- Wassmer, P., Schneider, J.-L., Fonfrère, A.-V., Lavigne, F., Paris, R., and 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
- Zhou, W., Van der Voo, R., Peacor, D. R., and Zhang, Y., 2000, Variable Ti-content and grain size of titanomagnetite as a function of cooling rate in very young MORB. *Earth and Planetary Science Letters*, 179, 9–20.