



## NUEVOS ENFOQUES METODOLÓGICOS PARA LA OBTENCIÓN DE PALEOINTENSIDADES ABSOLUTAS DE FIABILIDAD REFORZADA

E. M. Sánchez-Moreno<sup>1\*</sup>, M. Calvo-Rathert<sup>1</sup>, A. Gogichaishvili<sup>2</sup>,  
Vashakidze, G. T.<sup>3</sup>; Lebedev, V. A.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Física, EPS Rio Vena, Universidad de Burgos, Burgos, España.

<sup>2</sup> Laboratorio Interinstitucional de Magnetismo Natural (LIMNA), Instituto de Geofísica, Unidad Michoacán, Campus Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

<sup>3</sup> Alexandre Janelidze Institute of Geology, Ivane Javakhishvili Tbilisi State University, Tbilisi, Georgia.

<sup>4</sup> Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Sciences (IGEM RAS), Moscow, Russia.

\*e-mail: [emsanchez@ubu.es](mailto:emsanchez@ubu.es)

### ABSTRACT

In this study, we implement multi-method approach to obtain higher quality and reliability of absolute paleointensity values compared to those obtained through the usual procedures that consist of a single paleointensity determination method. This new protocol is motivated by previous studies in which the reliability of the available paleointensities is critically reevaluated. The data analysis by means of stricter selection criteria or classifying them according to the methods used, produce intensity values approximately half of the current value. On the contrary, when classical selection criteria are applied, values similar to the current geomagnetic field are obtained. This finding leads to reconsider the paleointensity values during both the stable and intermediate geomagnetic regimes. This allows to obtain much more precise models of the Earth's magnetic field behavior. The present study proposes two different strategies to obtain high technical quality absolute paleointensities. One of them consists of applying a set of very strict selection criteria to paleointensity determinations obtained by Thellier type methods and the second implies to combine paleointensities obtained by Thellier technique (with classical selection criteria) and multispecimen procedure.

**Keywords:** absolute paleointensity, ideal data, Thellier, multispecimen, weak time averaged field

### RESUMEN

En este trabajo nos planteamos la necesidad de obtener valores de paleointensidad absoluta de una mayor calidad y fiabilidad que los obtenidos mediante los procedimientos habituales que consisten en un único método de determinación de la paleointensidad, cuyos resultados son evaluados con unos determinados criterios de selección. Este planteamiento viene motivado por estudios previos en los que se cuestiona la fiabilidad de los datos de paleointensidad disponibles en la base global. El análisis de estos datos con criterios de selección más estrictos o clasificándolos según los métodos empleados, arrojan valores de intensidad aproximadamente la mitad del valor actual. Por el contrario, cuando son aplicados criterios de selección clásicos se obtienen valores similares al campo geomagnético actual. Este resultado nos lleva a replantearnos que valores de paleointensidad son representativos del comportamiento del campo tanto en momentos estables durante periodos de polaridad constante, como en momentos inestables durante excursiones geomagnéticas, cambios de polaridad y los intervalos de tiempo anteriores y posteriores a estos eventos. La tendencia en este campo se dirige hacia un incremento de datos ideales disponibles en las bases de datos que permitan realizar modelos del comportamiento del campo magnético terrestre más precisos. El estudio presentado propone dos estrategias diferentes para obtener paleointensidades de fiabilidad añadida. Una de ellas consiste en aplicar un conjunto de criterios de selección muy estricto a determinaciones de paleointensidad obtenidas mediante métodos tipo Thellier, y el segundo en combinar paleointensidades obtenidas mediante métodos tipo Thellier (con criterios de selección clásicos) y mediante métodos tipo multiespécimen.



**Palabras Clave:** paleointensidad absoluta, datos ideales, métodos Thellier, métodos multiespécimen, campo promediado en el tiempo débil

## 1. Introducción

Estudios previos de paleointensidad absoluta muestran diferentes resultados para rangos de edad similares, señalando la necesidad de obtener valores de intensidad del campo geomagnético antiguo de mayor calidad y con una fiabilidad añadida, a los que se venían obteniendo hasta ahora (v.g. Biggin *et al.*, 2007; Tauxe *et al.*, 2016). Esta cuestión ha surgido al analizar los datos disponibles en la base de datos global con criterios de selección más estrictos o clasificándolos según diferentes metodologías de determinación de la paleointensidad. Por ejemplo, Juárez y Tauxe (2000); Lawrence *et al.* (2009); Tauxe *et al.* (2013); Wang *et al.* (2015) obtienen valores del momento virtual axial dipolar (VADM de sus siglas en inglés) promediado para los últimos 5 Ma, usando criterios de selección estrictos, aproximadamente la mitad del valor actual. Por contraste, hay otros trabajos que defienden un campo promediado para los últimos 5 Ma similar al actual (p. ej. Heller *et al.*, 2002; McFadden, McElhinny, 1982), utilizando criterios de selección clásicos para evaluar determinaciones de paleointensidad. El análisis de los datos disponibles parece mostrar un sesgo importante causado por el grado de rigor de los criterios de selección o las metodologías aplicadas. Cuando los VADMs promediados se calculan con datos ideales, el valor del campo magnético terrestre (CMT) obtenido es mucho menor que con todos los datos disponibles en la base de datos.

## 2. Materiales

Los materiales estudiados corresponden a dos secuencias volcánicas plio-pleistocenas situadas al este de la región de Djavakheti, en el Cáucaso Menor (Sur de Georgia). Se han analizado 47 coladas basálticas en total, de las cuales 20 pertenecen a la secuencia de Apnia y 27 a la secuencia de Korkhi. Las dataciones radioisotópicas K-Ar asignan edades entre  $3.09 \pm 0.10$  Ma y  $3.70 \pm 0.20$  Ma a la secuencia de Apnia (Lebedev *et al.*, 2008) y entre  $3.00 \pm 0.20$  Ma y  $1.09 \pm 0.20$  Ma a la de Korkhi (Sánchez-Moreno *et al.*, 2018). El estudio paleomagnético previo muestra en la secuencia de Apnia, un primer tramo de 13 polaridades inversas, seguidas de una polaridad intermedia y un tramo superior de 5 polaridades normales. Korkhi se divide en dos subsecuencias, la inferior muestra 17 coladas de polaridad normal, mientras que en la parte superior una alternancia de 8 polaridades inversas e intermedias. El polo geomagnético virtual (VGP) medio de las diferentes poblaciones de diferente polaridad no coinciden con el esperado para la misma edad.

## 3. Metodología

En este trabajo se proponen dos estrategias diferentes para la obtención de paleointensidades de alta calidad y fiabilidad:

- 1) Métodos tipo Thellier (método TT: Thellier-Thellier, 1959; e IZZI: Yu *et al.*, 2004) con criterios de selección estrictos (CCRIT) (Cromwell *et al.*, 2015b; Tauxe *et al.*, 2016).
- 2) Enfoque multimétodo, con el que se combinan resultados de métodos tipo Thellier (Thellier-Thellier e IZZI) con criterios clásicos (basados en Leonhardt *et al.*, 2004) y métodos tipo multiespécimen: multispecimen parallel differential pTRM method (MSP-DB) (Biggin, Poidras, 2006; Dekkers, Böhnell, 2006) y multispecimen domain state correction (MSP-DSC) (Fabian, Leonhardt, 2010).

## 4. Resultados

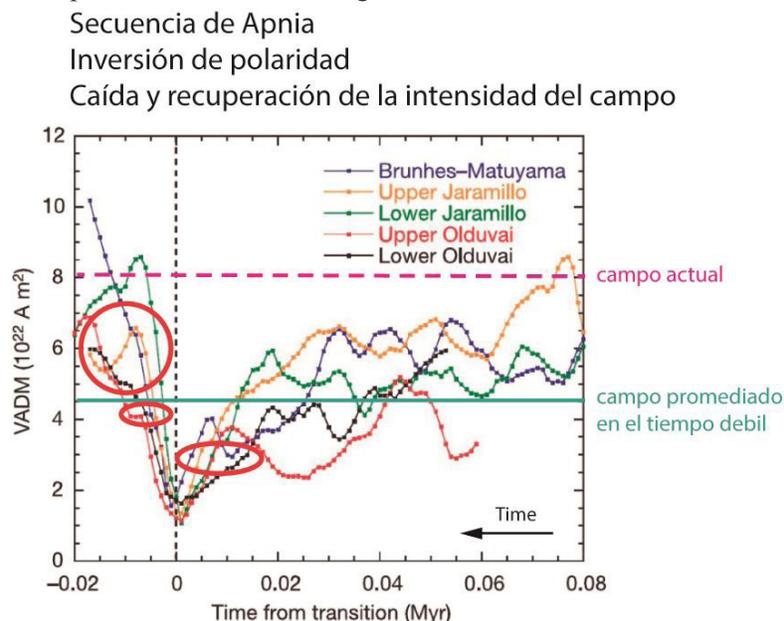
Los resultados obtenidos con ambas estrategias, determinaciones de tipo Thellier con criterios CCRIT y enfoque multimétodo, sobre todo se diferencian en el número de coladas en las cuales se ha podido determinar un valor medio fiable de paleointensidad (Tabla 1).



En general, las paleointensidades obtenidas están por debajo de la mitad del valor del campo magnético actual, excepto en Korkhi superior, donde solo se dispone de un dato con un valor pico asociado a direcciones intermedias-transicionales. El tramo superior de polaridad normal de Apnia, situado sobre la polaridad transicional, muestra una paleointensidad media mayor que el tramo inferior, previo a la transición, en los resultados proporcionados por las dos estrategias (Tabla 1). Por otro lado, los VADM obtenidos con Thellier y CCRIT en ambos tramos de la secuencia de Apnia son más cercanos a los valores de un campo promediado en el tiempo (TAF, time-averaged field) débil propuestos por diferentes autores ( $\sim 42\text{--}48 \text{ ZAm}^2$ , Juárez *et al.*, 1998; Tauxe, 2006), que los obtenidos mediante el enfoque multimétodo. Con el enfoque multimétodo, la intensidad en la parte inferior de Apnia es menor que el valor de TAF débil y mayor que este en la parte superior. En Korkhi inferior se obtienen valores de paleointensidad media bastantes cercanos a un TAF débil.

## 5. Discusión

Los VADM obtenidos en los tramos previo y posterior a la polaridad transicional de la secuencia de Apnia, son respectivamente de  $36.6$  y  $54.6 \text{ ZAm}^2$  con determinaciones tipo Thellier y criterio CCRIT, y de  $30.8$  y  $61.9 \text{ ZAm}^2$  con el enfoque multimétodo (Tabla 1). El VADM de la parte inferior de Apnia, antes del cambio de polaridad, está por debajo de las estimaciones que defienden un campo magnético promediado en el tiempo (TAF, time-averaged field) débil, mientras que el tramo superior muestra valores que están por encima de esta estimación. Se puede observar que el tramo previo a la transición muestra valores bajos de paleointensidad junto a direcciones cuyo VGP medio no coincide con el dipolo axial geocéntrico (GAD). Esta situación apoya la interpretación de un registro del CMT de régimen anómalo durante el cual disminuye el dipolo axial y se producen direcciones anómalas (Fig. 1.). El tramo posterior de polaridad normal, cuyo VGP medio tampoco coincide con el GAD, muestra un aumento de intensidad (aunque por debajo del valor actual). La sucesión de polaridades e intensidades permite ajustar el registro de Apnia al patrón asimétrico de intensidad descrito para las transiciones de polaridad, pero los datos direccionales son insuficientes y existe otra interpretación posible como la de un registro de TAF débil.



**Figura 1.** Valores de paleointensidad obtenidos en la secuencia de Apnia (círculos rojos) representados sobre varios registros de las inversiones de polaridad de los últimos 2 Ma obtenidos en materiales sedimentarios (long-cores oceánicos y lacustres) de distribución global. En la gráfica se representa el momento axial dipolar virtual (VADM frente al tiempo transcurrido a partir del cambio de polaridad completo. Nótese que el tiempo está representado al contrario. Imagen tomada de Valet *et al.* (2005).



En la subsecuencia de Korkhi inferior se obtienen VADM de 41.1 y 37.4  $ZAm^2$ , con Thellier y CCRIT y enfoque multimétodo respectivamente (Tabla 1) junto a una sucesión de polaridades normales estables, por lo que el registro coincide con los cálculos de un TAF de baja intensidad (Fig. 2.). Por otra parte, teniendo en cuenta un TAF similar al actual, podría tratarse de una caída de intensidad previa a una inversión de polaridad, durante la cual las direcciones todavía son estables, basándonos en observaciones donde se establece que la transición en intensidad comienza antes que la transición en dirección (Valet *et al.*, 2012). Sin embargo, los datos también son insuficientes para defender esta interpretación.

La subsecuencia de Korkhi superior es un registro reducido de polaridades inversas-intermedias, que produce un único valor de VADM de 128  $ZAm^2$  mediante el enfoque multimétodo (Tabla 1), aunque proviene de la media de tres determinaciones individuales con el método IZZI y criterios de selección usados habitualmente en la bibliografía. Este resultado puede encajar en la descripción de un registro producido al final de un periodo transicional, justo antes de la inversión completa de polaridad, donde hay una alta variabilidad direccional y comienza a producirse la recuperación del CMT con un rebote en la intensidad (Fig. 2.). Sin embargo, se trata de un solo dato fiable obtenido mediante uno de los métodos tipo Thellier.

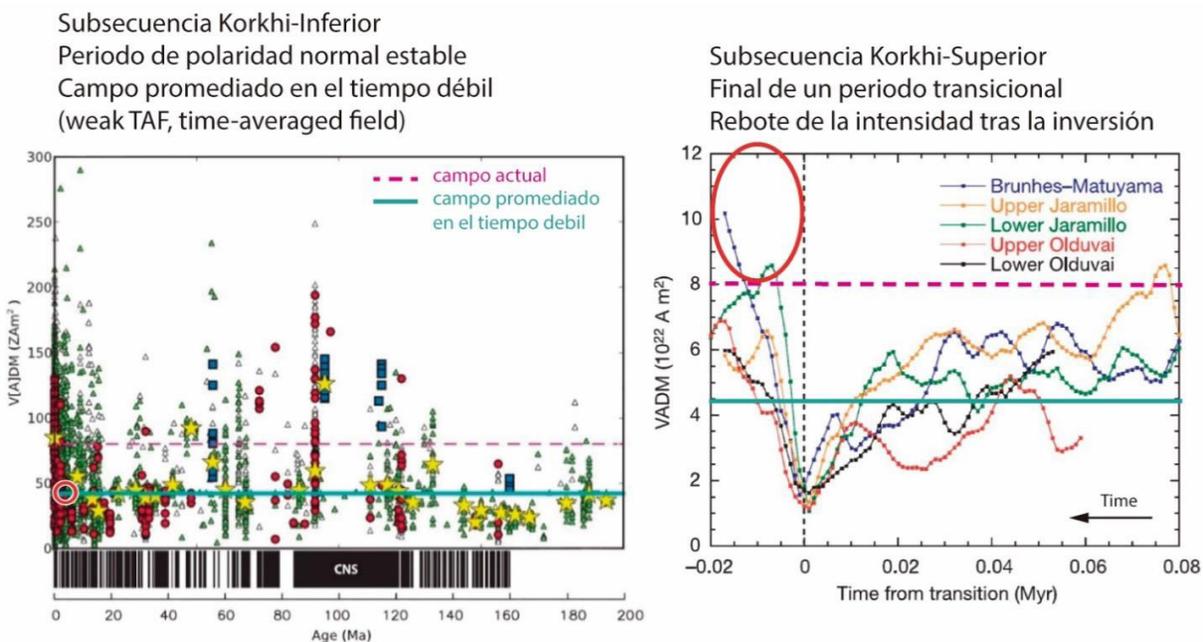
**Tabla 1.** Resultados de paleointensidad en las secuencias de Apnia y Korkhi (promediados por grupos direccionales) con las dos estrategias para la obtención de resultados de alta fiabilidad. Se muestra el error de cada media, y en el caso de un solo dato se ha tomado el error del promedio calculado en esa colada de lava. N: número de valores de paleointensidad promediados por colada de lava. B: paleointensidad.  $\sigma$ : error. VADM: momento axial dipolar virtual.

Secuencia	Thellier & CCRIT			multimétodo		
	N	B $\pm$ $\sigma$ ( $\mu T$ )	VADM $\pm$ $\sigma$ ( $ZAm^2$ )	N	B $\pm$ $\sigma$ ( $\mu T$ )	VADM $\pm$ $\sigma$ ( $ZAm^2$ )
Apnia polaridad normal (superior)	1	32.1 $\pm$ 3.3	54.6 $\pm$ 5.5	5	36.4 $\pm$ 6.9	61.9 $\pm$ 6.2
Apnia polaridad transicional				1	25.2 $\pm$ 1.6	42.9 $\pm$ 0.3
Apnia polaridad inversa (inferior)	7	21.5 $\pm$ 3.3	36.6 $\pm$ 5.6	14	18.1 $\pm$ 4.4	30.8 $\pm$ 3.2
Apnia completa	8	22.8 $\pm$ 4.8	38.9 $\pm$ 8.2	20	24.2 $\pm$ 6.8	41.2 $\pm$ 4.0
Korkhi-Superior				1	75.0 $\pm$ 6.3	128.0 $\pm$ 11.0
Korkhi-Inferior	3	24.2 $\pm$ 7.1	41.1 $\pm$ 12.1	13	22.0 $\pm$ 6.0	37.4 $\pm$ 10.2

## 6. Conclusiones

El análisis realizado en las dos secuencias muestra diferentes comportamientos del CMT. En Apnia se puede descartar un valor de TAF débil gracias a que las direcciones paleomagnéticas muestran un cambio de polaridad completo. En este caso, al tratarse de intensidades debilitadas al inicio de una transición (Fig. 1.), los valores del campo durante un periodo estable serían más intensos. De esta forma las paleointensidades obtenidas contribuyen a reforzar la línea de resultados en la que se defiende un TAF similar al actual para los periodos de polaridad estable.

Las bajas paleointensidades obtenidas en Korkhi inferior y una dirección paleomagnética media que no coincide con el polo esperado podrían representar la caída de paleointensidad previa a una inversión de polaridad. Sin embargo, la interpretación de un registro de campo estable no puede descartarse porque la dirección paleomagnética media muestra solo una desviación moderada respecto a la esperada, no se han obtenido polaridades inversas ni transicionales que puedan señalar una inversión y los VADM obtenidos son muy cercanos a los resultados de los estudios que señalan valores de intensidad de campo bajos durante los periodos CMT estables. Por todo lo anterior, interpretamos las paleointensidades obtenidas como representativas de un TAF débil (Fig. 2.).



**Figura 2.** Derecha: Valores de paleointensidad obtenidos en la subsecuencia de Korkhi-inferior (círculo rojo) representados sobre los datos disponibles en la base de datos MagIC para los últimos 200 Ma y a partir de los cuales Tauxe *et al.*, 2013 obtiene un campo promediado en el tiempo de  $42\text{--}48 \text{ ZAm}^2$  ( $Z = 10^{21}$ ). Izquierda: Valores de paleointensidad obtenidos en la subsecuencia de Korkhi-superior (círculo rojo) representados sobre la imagen tomada de Valet *et al.* (2005) (ver explicación en Fig. 1.).

Korkhi superior es una secuencia corta que no permite una imagen clara del comportamiento del CMT registrado. Las polaridades registradas muestran un régimen del CMT anómalo (polaridades inversas e intermedias alternadas). Las paleointensidades obtenidas, menos fiables que en el resto de secuencias, no coinciden con los valores de un TAF débil durante periodos de polaridad estable. Se trata de un solo valor de intensidad muy alto que podría representar el rebote en intensidad sufrido por el campo al final de una inversión de polaridad (Fig. 2.) durante el cual se produce una alta variabilidad direccional.

### Agradecimientos

Trabajo se financiado por los proyectos CGL2012-32149 (MINECO) y BU235P18 (Junta de Castilla y León), el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) y el apoyo financiero proporcionado por by DGAPA-PAPIIT IN101717.

### Referencias

- Biggin, A.J., Perrin, M., Dekkers, M.J., 2007. A reliable absolute palaeointensity determination obtained from a non-ideal recorder 257, 545–563. doi:10.1016/j.epsl.2007.03.017
- Biggin, A.J., Poidras, T., 2006. First-order symmetry of weak-field partial thermoremanence in multi-domain ferromagnetic grains. 1. Experimental evidence and physical implications. *Earth Planet. Sci. Lett.* 245, 438–453. doi:10.1016/j.epsl.2006.02.035
- Cromwell, G., Tauxe, L., Halldórsson, S.A., Halldórsson, S.A., Halldórsson, S.A., 2015a. New paleointensity results from rapidly cooled Icelandic lavas: Implications for Arctic geomagnetic field strength. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 120, 2913–2934. doi:10.1002/2014JB011828



- Cromwell, G., Tauxe, L., Staudigel, H., Ron, H., 2015b. Paleointensity estimates from historic and modern Hawaiian lava flows using glassy basalt as a primary source material. *Phys. Earth Planet. Inter.* 241, 44–56. doi:10.1016/j.pepi.2014.12.007
- Dekkers, M.J., Böhnell, H.N., 2006. Reliable absolute palaeointensities independent of magnetic domain state. *Earth Planet. Sci. Lett.* 248, 507–516. doi:10.1016/j.epsl.2006.05.040
- Fabian, K., Leonhardt, R., 2010. Multiple-specimen absolute paleointensity determination: An optimal protocol including pTRM normalization, domain-state correction, and alteration test. *Earth Planet. Sci. Lett.* 297, 84–94. doi:10.1016/j.epsl.2010.06.006
- Heller, R., Merrill, R.T., McFadden, P.L., 2002. The variation of intensity of earth's magnetic field with time. *Phys. Earth Planet. Inter.* 131, 237–249. doi:10.1016/S0031-9201(02)00038-9
- Juarez, M.T., Tauxe, L., 2000. The intensity of the time-averaged geomagnetic field: the last 5 Myr. *Earth Planet. Sci. Lett.* 175, 169–180. doi:10.1016/S0012-821X(99)00306-4
- Juárez, M.T., Tauxe, L., Gee, J.S., Pick, T., 1998. The intensity of the Earth's magnetic field over the past 160 million years. *Nature* 394, 878–881. doi:10.1038/29746
- Lawrence, K.P., Tauxe, L., Staudigel, H., Constable, C.G., Koppers, A., McIntosh, W., Johnson, C.L., 2009. Paleomagnetic field properties at high southern latitude. *Geochemistry, Geophys. Geosystems* 10. doi:10.1029/2008GC002072
- Lebedev, V.A., Bubnov, S.N., Dudauroi, O.Z., Vashakidze, G.T., 2008. Geochronology of Pliocene volcanism in the Dzhavakheti Highland (the Lesser Caucasus). Part 2: Eastern part of the Dzhavakheti Highland. Regional geological correlation. *Stratigr. Geol. Correl.* 16, 553–574. doi:10.1134/S0869593808050080
- Leonhardt, R., Heunemann, C., Krasa, D., 2004. Analyzing absolute paleointensity determinations: Acceptance criteria and the software ThellierTool4.0. *Geochemistry, Geophys. Geosystems* 5, 1–11. doi:10.1029/2004GC000807
- McFadden, P.L., McElhinny, M.W., 1982. Variations in the Geomagnetic Dipole 2: Statistical Analysis of VDMs for the Past 5 Million Years. *J. Geomagn. Geoelectr.* 34, 163–189. doi:10.5636/jgg.34.163
- Sánchez-Moreno, E.M., Calvo-Rathert, M., Goguitchaichvili, A., Vashakidze, G.T., Lebedev, V.A., 2018. Evidence of Unusual Geomagnetic Regimes Recorded in Plio-Pleistocene Volcanic Sequences from the Lesser Caucasus (Southern Georgia). *Geochemistry, Geophys. Geosystems* 19, 1–18. doi:10.1029/2017GC007358
- Tauxe, L., 2006. Long-term trends in paleointensity: The contribution of DSDP/ODP submarine basaltic glass collections. *Phys. Earth Planet. Inter.* 156, 223–241. doi:10.1016/j.pepi.2005.03.022
- Tauxe, L., Gee, J.S., Steiner, M.B., Staudigel, H., 2013. Paleointensity results from the Jurassic: New constraints from submarine basaltic glasses of ODP Site 801C. *Geochemistry, Geophys. Geosystems* 14, 4718–4733. doi:10.1002/ggge.20282
- Tauxe, L., Shaar, R., Jonestrask, L., Swanson-Hysell, N.L., Minnett, R., Koppers, A.A.P., Constable, C.G., Jarboe, N., Gaastra, K., Fairchild, L., 2016. PmagPy: Software package for paleomagnetic data analysis and a bridge to the Magnetics Information Consortium (MagIC) Database. *Geochemistry, Geophys. Geosystems* 17, 2450–2463. doi:10.1002/2016GC006307
- Thellier, E., Thellier, O., 1959. Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique. *Ann. Geophys.* 15, 285–376.
- Valet, J.-P., Fournier, A., Courtillot, V., Herrero-Bervera, E., 2012. Dynamical similarity of geomagnetic field reversals. *Nature* 490, 89–93. doi:10.1038/nature11491
- Wang, H., Kent, D. V., Rochette, P., 2015. Weaker axially dipolar time-averaged paleomagnetic field based on multidomain-corrected paleointensities from Galapagos lavas. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 112, 15036–15041. doi:10.1073/pnas.1505450112
- Yu, Y., Tauxe, L., Genevey, A., 2004. Toward an optimal geomagnetic field intensity determination technique. *Geochemistry, Geophys. Geosystems* 5, n/a-n/a. doi:10.1029/2003GC000630