



PALEOMAGNETISMO Y FECHAMIENTO $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ DE UNA SECUENCIA DE COLADAS DE LA LAVA PLIOCENICAS EN EL CÁUCASO MENOR: REGISTRO DE UNA ROTACIÓN Y ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN PALEOSECULAR

Ana Caccavari^{1*}, Manuel Calvo-Rathert², Avto Gogichaishvili^{1,2}, He Huaiyu³, Goga Vashakidze⁴, Néstor Vegas⁵

¹Laboratorio Interinstitucional de Magnetismo Natural, Instituto de Geofísica, Sede Michoacán UNAM –Campus Morelia, México

²Departamento de Física, EPS, Universidad de Burgos, c/ Francisco de Vitoria, s/n, 09006 Burgos, Spain

³Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 19, Beitucheng Xilu, 100029 Beijing, PR China

⁴Alexandre Janelidze Institute of Geology, I. Javakhishvili Tbilisi State University, Georgia

⁵Departamento de Geodinámica, Universidad del País Vasco, 48940 Leioa, Bizkaia, Spain

RESUMEN

Se realizó un estudio de paleomagnetismo y magnetismo de las rocas, datación $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ y microscopia electrónica en una secuencia de 39 lavas basálticas doleríticas pliocénicas en la Meseta de Djhvakheti en el Cáucaso Menor, Georgia.

Los experimentos termomagnéticos sugieren titanomagnetitas con diferentes contenido de Titanio como los principales portadores de la remanencia y tamaños de grano resultado de una mezcla de dominio simple y multidominio. Las dataciones $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ arrojan una edad de $1.73 \pm 0.03\text{Ma}$. Todas las coladas tienen polaridad inversa y dirección media $D = 202.2^\circ$, $I = -60.6^\circ$ ($N = 39$; $\alpha_{95} = 2.0^\circ$; $k = 138.6$).

La inclinación obtenida, concuerda con la esperada, mientras que la Declinación muestra una rotación hacia el Este de $19.2^\circ \pm 5.8^\circ$ que debe haber ocurrido los últimos 1.7 Ma.

El análisis de la dispersión angular de los VGPs para los flujos es $S_B = 16.5$ ($S_{up} = 19.5$ $S_{low} = 14.3$) que concuerda con la dispersión angular esperada para una latitud de 41° del Modelo G para lavas de 5 Ma.

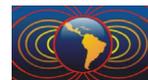
Se tienen dos interpretaciones del tiempo de emplazamiento de la sección: a) Los 36 flujos inferiores se emitieron entre los cronos de polaridad normal Reunión y Olduvai, y los tres superiores después de Olduvai, o b) la sección entera se emitió entre 1.778 Ma y $1.73 \pm 0.03\text{Ma}$.

Palabras clave: paleomagnetismo, magnetismo de rocas, rotación, variación paleosecular, datación $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, Cáucaso.

ABSTRACT

A paleomagnetic, rock magnetic investigation, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating and electronic microscope studies has been carried out on a Pliocene lava flow sequence in the Djhvakheti Highland, central Lesser Caucasus, Georgia.

A ChRM direction could be isolated in all studied 39 lava flows, yielding reverse-polarity directions in all cases. Mean direction $D = 202.2^\circ$, $I = -60.6^\circ$ ($N = 39$; $\alpha_{95} = 2.0^\circ$; $k = 138.6$). Thermomagnetic experiments suggested low-Ti titanomagnetites and low Curie-temperature titanomagnetites with higher titanium content as the main carriers of remanence, which is carried by a mixture of single-



domain and multi-domain grains. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating yielded an age of 1.73 ± 0.03 Ma as the eruption age of uppermost lava flow of the sequence.

While the inclination obtained in the sequence agrees well with the expected one, the declination shows an eastward deviation of $19.2^\circ \pm 5.8^\circ$. Thus, a significant 19° clockwise vertical-axis rotation took place in the Saro sequence during the last 1.7 Ma

Analysis of the scatter of virtual geomagnetic poles (VGPs) from all 39 lava flows yields an angular scatter $S_B = 16.5$ ($S_{\text{up}} = 19.5$, $S_{\text{low}} = 14.3$), while a value $S_B = 19.0^\circ$ ($S_{\text{up}} = 25.4$, $S_{\text{low}} = 15.2$) is obtained with 14 directional groups. In both cases S_B agrees well with the angular dispersion predicted for latitude 41° by Model G-fits to data of paleosecular variation of lavas from the last 5 Ma.

Key words: Paleomagnetism, rock-magnetism, vertical-axis rotation, paleosecular variation, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating, Caucasus.

Introducción

El campo magnético de la Tierra generado en el núcleo externo no es estático y presenta variaciones tanto espaciales como temporales. Variaciones tanto de dirección como de magnitud con periodos entre años y decenas de miles de años se conocen como variación secular. La variación secular antes de los observatorios magnéticos se conoce como variación paleosecular (PSV).

Un método utilizado para estimar la variabilidad del campo geomagnético es observar la desviación angular estándar (ASD) de los polos geomagnéticos virtuales (VGP) para una localidad dada. Este tipo de estudios se puede realizar en rocas ígneas, particularmente en flujos de lava que proveen un registro del paleocampo en un momento y lugar específicos. Diversas combinaciones de componentes dipolares y no dipolares muestran las características de ASD de la PSV con la latitud (McFadden *et al.*, 1988, 1991; Lawrence *et al.*, 2006; Johnson *et al.* 2008). Johnson *et al.* (2008) reporta una nueva compilación de datos paleomagnéticos a lo largo del mundo. La dependencia de la latitud que tiene la dispersión de los VGPs que se muestra en estos datos, parece menos importante que la que se muestra en la recopilación hecha por McFadden *et al.* (1991).

Durante las últimas dos décadas, se han realizado numerosos estudios paleomagnéticos del Cáucaso (Bazhenov *et al.*, 1996; Camps *et al.*, 1996; Goguichaichvili *et al.*, 1997; Goguichaichvili *et al.*, 2000; Goguitchaichvili and Parès, 2000; Goguichaichvili *et al.*, 2001; Bazhenov and Burtman, 2002; Calvo-Rathert *et al.*, 2008; Goguichaichvili *et al.*, 2009, Shcherbakova *et al.*, 2009, Calvo-Rathert *et al.*, 2011, Calvo-Rathert *et al.*, 2013). Sin embargo, siguen siendo limitados. El Cáucaso es una región con una historia tectónica compleja debido a su posición entre las placas Eurasiática y Arábiga que convergen entre sí (*e.g.*, Adamia *et al.*, 2011). Las direcciones paleomagnéticas son una excelente fuente para obtener información sobre las posibles rotaciones tectónicas que pueden haberse presentado. Debido a esto, el análisis de datos paleomagnéticos obtenidos en rocas volcánicas del Cáucaso son de gran interés tectónico y geológico.

En este trabajo se presentan nuevos datos paleomagnéticos, de magnetismo de rocas, microscopía electrónica y dataciones de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de una secuencia de 39 coladas de lava de edad pliocénica. La secuencia se encuentra ubicada en la meseta de Djhavakheti en el Cáucaso Menor (fig. 1). Los objetivos principales de este trabajo son incrementar los datos paleomagnéticos del área, la obtención de direcciones paleomagnéticas que sirven para entender el contexto tectónico y contribuir al estudio de las variaciones del campo geomagnético.

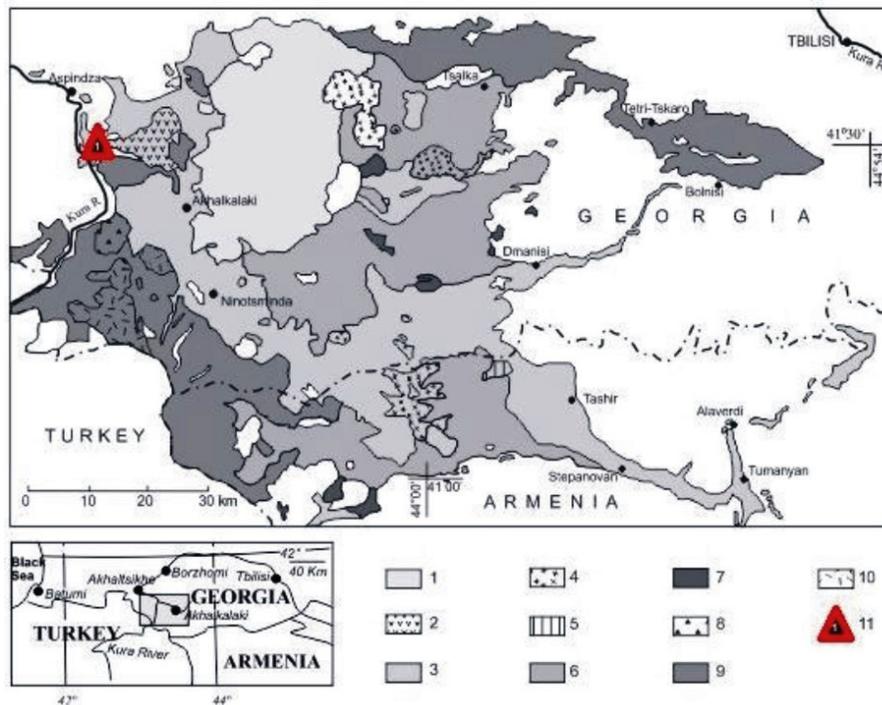


Figura 1. Mapa geológico esquemático (Modificado de Lebedev *et al.*, 2008 and Calvo-Rathert *et al.*, 2013) del vulcanismo Pliocénico-Cuaternario en la meseta de Djavakheti. Mostrando la secuencia de Saro, muestreada en el presente estudio. **1:** Volcanes cuaternarios del ridge Samsari (800–0 ka); **2:** Lavas básicas (1.75–1.55 Ma); **3:** Lavas básicas (2.15–1.95 Ma). **4:** Lavas dacíticas del ridge de Djavakheti (2.25 Ma); **5:** Hyalodacita (2.5 Ma); **6:** Lavas básicas (2.65–2.45 Ma); **7:** Riolitas y dacitas de los volcanes Chikiani, Agvorik y Busistsikhe (2.85–2.6 Ma); **8:** Dacitas (3.15–3.11 Ma) del flujo de lava Kumurdo; **9:** Lavas básicas (3.22–3.04 Ma); **10:** Lavas básicas (3.75–3.55 Ma); **11:** Secuencia de lava muestreada (Saro)

Contexto geológico y muestreo

La zona de estudio está en la meseta de Dzhavakheti, región volcánica en la parte central del Cáucaso Menor en Georgia. Forma parte del cinturón orogénico Alpino-Himalaya, que resulta del movimiento de las placas Euroasiática y Arábiga (Adamia *et al.*, 2008)

La región del Cáucaso se caracteriza por la complejidad de su actividad tectónica, mostrando fallas tanto compresivas N-S como extensional E-W (Rebaï *et al.*, 1993). También por su importante y continua actividad volcánica desde el Jurásico hasta el presente (*e.g.*, Rebaï *et al.*, 1993).

El presente estudio se llevó a cabo en la meseta Djavakheti una de las grandes regiones neovolcánicas del Cáucaso Menor (fig. 1). La meseta cuenta con diversos flujos de lava, uno de ellos es el Kura formado por coladas basálticas, y donde se ubica la secuencia de Saro. Lebedev *et al.* (2008) analizó y tomó 6 muestras de diferentes horizontes por el método de K-Ar obteniendo edades que varían entre 2.23 y 2.03 Ma. En este estudio se presenta una datación $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$. Lebedev *et al.*, 2008 reconoce y muestrea 18 coladas formadas por lavas desde masivas hasta vesiculares. En este estudio se reconocen y muestrean 39 coladas de lava, divididas en 2 partes (SR39-SR4 y SR1-SR3). Las muestras fueron colectadas con un taladro portátil de gasolina y orientadas con una brújula solar y una magnética. Se obtuvo un promedio de 8 muestras por flujo.



Magnetismo de rocas y microscopio electrónico

Temperaturas de Curie y estabilidad termica.

Se midieron curvas termomagnéticas en aire calentando la muestra hasta 600 a 700 °C y enfriándola a temperatura ambiente. Se distinguieron cuatro tipos de curvas (fig. 2):

Tipo H, reversibles y una sola fase ferromagnética, Temperatura de Curie (TC) cercanas a 580° C. que corresponde a Titanomagnetita con bajo contenido de Ti o Al- o Mg. sustituyendo la magnetita. (6 flujos).

Tipo-H* (11 flujos). TC≈580° C, no reversible.

Tipo L muestras con una sola fase, TC entre 130 y 280 °C, que corresponden a titanomagnetita con un mayor contenido de Ti. En la curva de enfriamiento sólo se reconoce magnetita (ocho flujos).

Tipo F, (14 flujos). Dos fases ferromagnéticas en la curva de calentamiento: una baja (200° C a 400° C) y una alta (titano-magnetita, baja en Ti). Una fase de enfriamiento. No reversible.

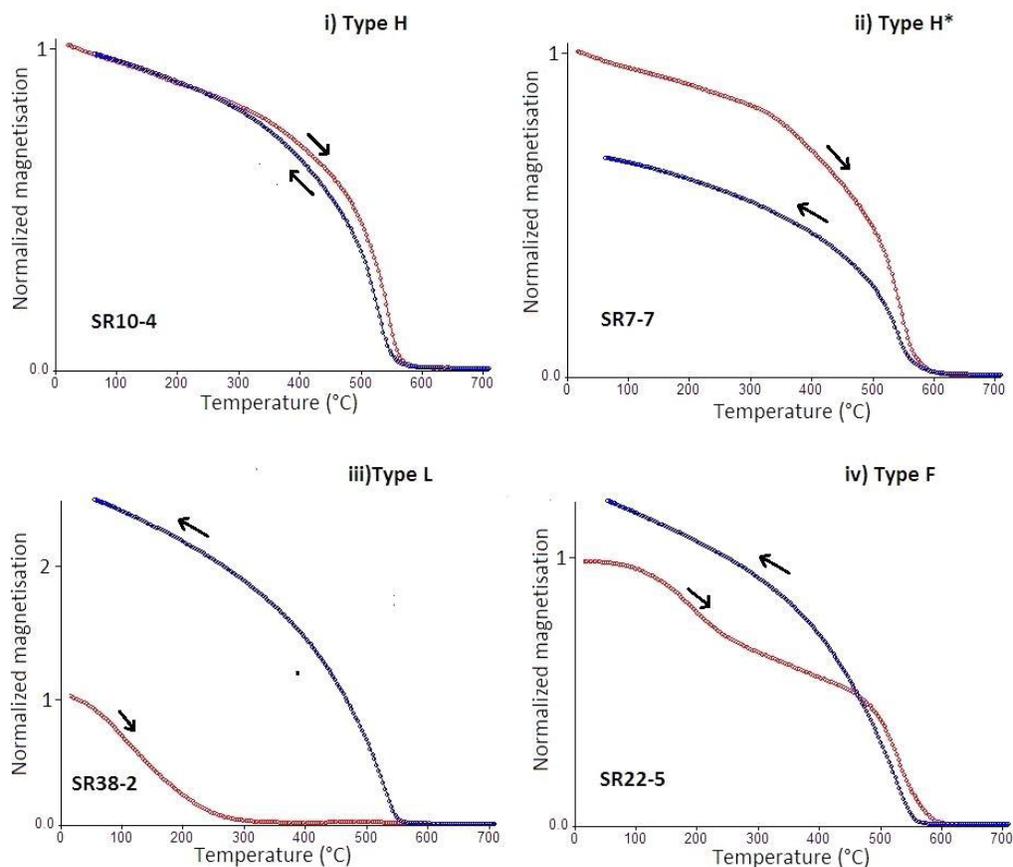


Figura 2. Curvas termomagnéticas. Las flechas señalan las curvas de enfriamiento y de calentamiento.

Adquisición de IRM y experimentos de histéresis

Las medidas de IRM apuntan a fases de baja coercitividad como portadores de la remanencia. El diagrama de Day (Day *et al.*, 1977), muestra un comportamiento de dominio pseudo-simple PSD, esto se puede explicar como una mezcla de monodominio SD y de multidominio MD



Microscopio electrónico

Imágenes de retrodispersión y análisis de composición se obtuvieron en la Universidad del País Vasco (UPV/EHU, Bilbao, Spain), utilizando un microscopio de barrido electrónico JEOL JSM-6400. Los minerales de la matriz representan 2-4% de la roca y con un rango de longitud de 2 a 100 μm . Estos minerales se distribuyen homogéneamente en los intersticios de la plagioclasa y el piroxeno cristalino, así como en sus contactos. Los minerales de matriz se identificaron como titanomagnetita y granos de ilmenita que forman cristales individuales. Los cristales más grandes de 100-200 μm son titanomagnetitas.

Mediciones paleomagnéticas

Las mediciones se llevaron a cabo en el laboratorio paleomagnético de la Universidad de Burgos con un magnetómetro superconductor 2G (sensibilidad nominal $\sim 10^{-12}$ Am²). Se desmagnetizó un total de 281 especímenes, un promedio de 7 por flujo: 194 por AF y 87 por desmagnetización térmica. Ocho sitios muestran una sola componente paleomagnética, mientras que el resto muestra una pequeña componente viscosa que es fácilmente removida (alrededor de 10 mT o 100-250 °C). Polaridad inversa en todos los flujos y una dirección media de $D = 202.2^\circ$, $I = -60.6^\circ$ ($N = 39$; $\alpha_{95} = 2.0^\circ$; $k = 138.6$)

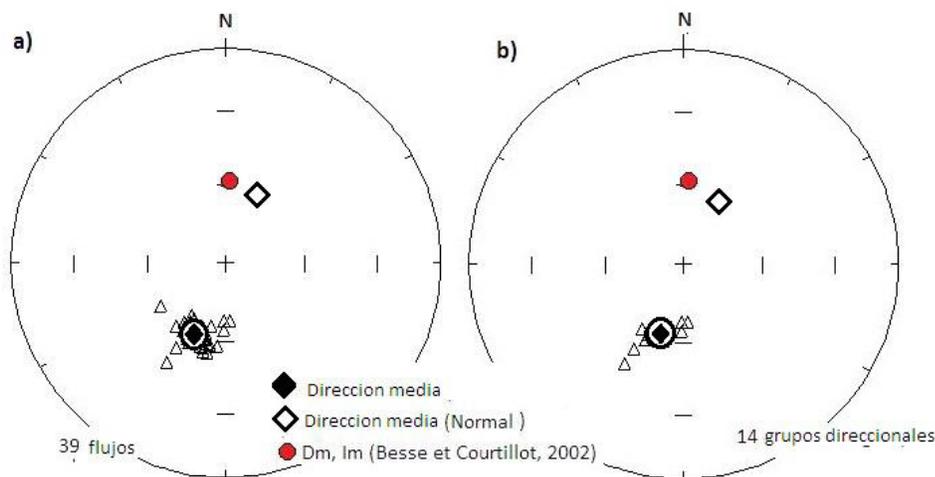
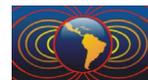


Figura 3. Proyección de igual área. a) Media de los 39 flujos, b) media de los 14 grupos direccionales. También se observa la dirección obtenida por el APWP (Besse y Courtillot, 2002) para Europa en una ventana de 0 Ma. Se muestra su α_{95} .

Resultados y discusión

El polo paleomagnético obtenido para la secuencia de Saro es longitud $\lambda = 124.6^\circ$ E y latitud $\phi = 73.5^\circ$ N ($N = 39$; $A_{95} = 2.7^\circ$; $k = 73.0$). Comparado con el polo obtenido en la curva de deriva polar aparente (APWP) para Europa obtenido por Besse y Courtillot (2002) para cada 5 Ma usando ventanas de 10 Ma. Cuando el polo de la secuencia de Saro se compara con la ventana de 0 Ma (longitud $\lambda = 178.7^\circ$ E, latitud $\phi = 86.7^\circ$ N; $A_{95} = 3.0$; $k = 96.1$), la distancia angular obtenida es $\Delta = 14.8^\circ$, y si se compara con la ventana de 5 Ma ($\lambda = 172.0^\circ$ E; $\phi = 86.3^\circ$ N; $A_{95} = 2.6$; $k = 105.1$) la dispersión angular es $\Delta = 14.3^\circ$.

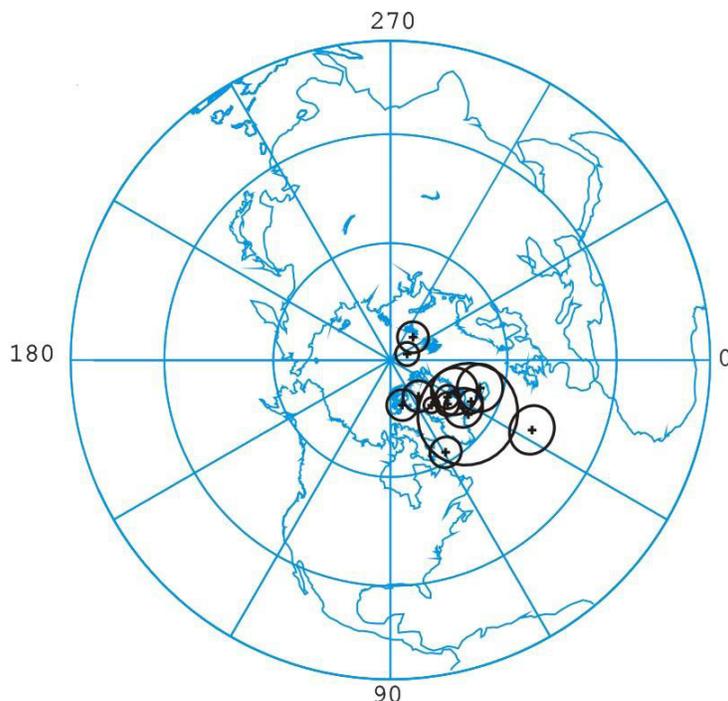
Se observa la rotación en el eje vertical mediante la comparación de la declinación observada y la esperada $R = D_0 - D_{EX}$. Igualmente para la inclinación $F = I_{EX} - I_0$. Utilizando las direcciones obtenidas en la APWP de (Besse and Courtillot, 2002), para la ventana de 0 Ma, se obtiene un



pequeño ángulo en F , $F = -2.4^\circ \pm 3.1^\circ$. Mientras que la rotación en el eje vertical es de $R = 19.2^\circ \pm 5.8^\circ$, que tuvo lugar en la secuencia de Saro durante los últimos 1.7 Ma. Debido al movimiento de las placas Arábica y Eurasiática, como se mencionó anteriormente, existen gran cantidad de fallas tanto compresionales como extensionales. Siendo este tipo de fallas probablemente las responsables de la rotación en el eje vertical de la secuencia de Saro.

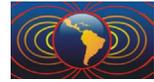
En algunos casos flujos consecutivos presentan direcciones paleomagnéticas indistinguibles una de otra, por lo que, con base en diversos criterios, se agruparon en 14 grupos direccionales. Obteniendo una dirección media para estos $D = 204.1^\circ$, $I = -61.5^\circ$, ($\alpha_{95\%} = 4.0^\circ$, $k = 97.6$) y un polo paleomagnético $\lambda 120.7^\circ$ E y $\varphi = 72.3^\circ$ ($A_{95} = 5.8^\circ$; $k = 45.6$).

Figura 4. Proyección estereográfica de los VGP's de los 14 grupos direccionales. La dispersión angular, S_B obtenida para los 14 grupos direccionales (ventana 0 Ma APWP de (Besse y Courtillot, 2002), $S_B = 19.0^\circ$ ($S_{up} = 25.4$, $S_{low} = 15.2$). Y el mismo cálculo para los 39 flujos es $S_B = 16.5$ ($S_{up} = 19.5$ $S_{low} = 14.3$).



Este resultado es comparado con la dispersión angular obtenida por el modelo G para lavas de 5 Ma McElhinny y McFadden (1997) y Johnson *et al.* (2008) para una latitud de 41° . a) El valor de S_B obtenido de los flujos concuerda perfectamente con el valor de modelo G, mientras que para los flujos es ligeramente mayor.

Se obtiene una edad de 1.73 ± 0.03 Ma por el método de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ para el flujo superior de la secuencia y se tienen seis edades de K-Ar determinadas por Lebedev *et al.* (2008) en seis flujos de la secuencia que varían entre 2.03 ± 0.11 Ma y 2.23 ± 0.13 Ma. Los 39 flujos arrojan polaridad inversa y no están separados estratigráficamente, sólo en los flujos inferiores (SR39 and SR38). Una discontinuidad debe existir entre las dos partes de la secuencia (los 3 flujos superiores y el resto). Estos resultados se pueden explicar tomando en cuenta que la parte inferior de la secuencia (SR39-SR4) se emitió durante el cron Matuyama antes del periodo de polaridad normal Olduvai. Debido a la continua emisión del perfil de Saro (SR39-SR4), el hecho de que no registre polaridad normal implica que la emisión de lavas empezó después del Cron Reunión. Esto es válido para las edades obtenidas por Lebedev *et al.* (2008) debido a las relativamente grandes incertidumbres que tienen, los tres flujos superiores implican, un hiato en la actividad volcánica de más de 150 mil años durante el Cron de polaridad normal Olduvai. Los flujos SR3-SR1 se emitieron entre 1.778



Ma y 1.73 ± 0.03 Ma. Sin embargo, la similitud de las direcciones paleomagnéticas determinadas en los flujos de SR3 (perfil superior) y SR4 (perfil inferior). Sólo 2.1° . Ambas son indistinguibles y se han incluido en el mismo grupo direccional. La emisión de lavas de ambos perfiles habría sido continua, lo que implica la emisión de toda la secuencia de entre 1.778 Ma y $1.73 + 0.03$ Ma.

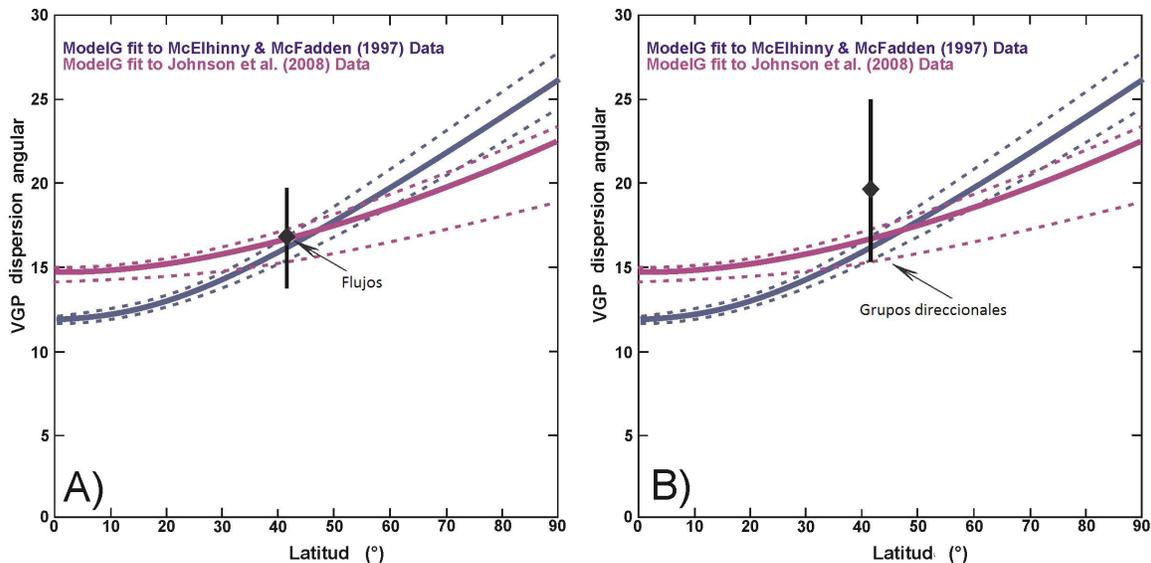


Figura 5. Dispersión angular vs Latitud. Comparación con el modelo G con datos McElhinny y McFadden (1997) y Johnson *et al.* (2008) para flujos en (A) y para grupos en (B).

Conclusiones

Se desarrollaron mediciones de magnetismo de rocas y paleomagnéticas de 39 flujos de lava de la sección Saro, ubicada en la meseta de Djavakheti en el Cáucaso Menor en Georgia. Se realizaron dataciones de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ y análisis de microscopio electrónico. Se obtiene una edad de 1.73 ± 0.03 Ma para la lava superior de la secuencia (SR1).

Se obtuvo la ChRM de los 39 flujos, todos con polaridad normal. La dirección media es $D = 202.2^\circ$, $I = -60.6^\circ$ ($N = 39$; $\alpha_{95} = 2.0^\circ$; $k = 138.6$). Con un polo paleomagnético $\lambda = 124.6^\circ$ E y $\varphi = 73.5^\circ$ N ($N = 39$; $A_{95} = 2.7^\circ$; $k = 72.98$). Comparado con la ventana de 0 Ma para Europa de la APWP (Besse y Courtillot, 2002), hay una desviación de 14.8° . Mientras que la inclinación observada es muy similar a la esperada, la declinación muestra una rotación de $19.2^\circ \pm 5.8^\circ$ al Este, que debió ocurrir durante los últimos 1.7 Ma.

Para analizar la variación secular en la secuencia se definen grupos direccionales, en los que se promedian las direcciones de flujos sucesivos que registren la misma dirección del campo. El análisis de la dispersión de los VGPs da un valor de $S_B = 19.0^\circ$ ($S_{up} = 25.4$, $S_{low} = 15.2$) para los grupos direccionales y de $S_B = 16.5$ ($S_{up} = 19.5$, $S_{low} = 14.3$) para los flujos. En ambos casos concuerda con el modelo G para variación latitudinal con datos de variación paleosecular de lavas de 5 Ma. (McElhinny and McFadden, 1997; Johnson *et al.*, 2008)

El análisis de las edades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ y de las polaridades inversas permiten diferentes explicaciones sobre el tiempo de emplazamiento de la sección. Los 36 flujos inferiores (SR39 to SR4) se pudieron haber emitido entre los cronos de polaridad normal Reunion y Olduvai, y los otros tres (SR3-SR1) después del cron Olduvai. Esta interpretación implica un hiato en la actividad volcánica de más de 150 mil años, pero que



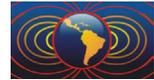
concuera con las edades obtenidas por Lebedev *et al.* (2008). Por otro lado, la secuencia completa se pudo haber emitido entre 1.778 Ma and 1.73 ± 0.03 Ma, esta interpretación concuerda con la emisión rápida de la secuencia propuesta por Lebedev *et al.* (2008).

Agradecimientos.

Este trabajo se financió por el proyecto CGL2012-32149 (*Ministerio de Economía y Competitividad*, España) y los proyectos CGL2011-23755 y CGL2010-14869 (*Ministerio de Ciencia e Innovación*). AC agradece a CONACYT la beca no. 257639 (México). AG agradece al programa de año sabático de la Universidad de Burgos (España). Se agradece también el apoyo técnico y humano brindado por SGIker (UPVEHU, MINECO, GV/EJ, ERDF y ESF).

Referencias

- Adamia, S., Mumladze, T., Sadradze, N., Tsereteli, E., 695 Tsereteli, N. and A. Varazanashvili, 2008. Late Cenozoic Tectonics and Geodynamics of Georgia(SW Caucasus). *Georgian Int. Journal of Sciences, Technology and Medicine*, Vol. 1, 1, 77-107.
- Adamia, S., Zakaraiadze, G., Chkhouta, T., Sadradze, N., Tsereteli, N., Chabukiani, A., Gventsadze, A., 2011. Geology of the Caucasus: A Review. *Turkish J. Earth Sci.*, Vol. 20, 489-544. Doi: 10.3906/yer-1005-11.
- Bazhenov, M. Burtman, V. and Levashova, N., 1996. Lower and Middle Jurassic paleomagnetic results from the south Lesser Caucasus and the evolution of the Mesozoic Tethys ocean. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 141, 79-89.
- Bazhenov, M., Burtman, V., 2002. Eocene paleomagnetism of the Caucasus (southwest Georgia): oroclinal bending in the Arabian syntaxis. *Tectonophysics*, 344, 247-259.
- Besse, J., V., Courtillot, 2002. Apparent and true polar wander and the geometry of the geomagnetic field over the last 200 Myr. *J. Geophys. Res.*, 107, B11, 2300, doi:10.1029/2000JB000050.
- Calvo-Rathert, M., Goguichaichvili, A., Sologashvili, D., Villalaín, J. J., Bógalo, M. F., Carrancho, A., Maissuradze, G., 2008. New paleomagnetic data from the hominin bearing Dmanisi paleoanthropologic site (southern Georgia, Caucasus). *Quaternary Research* 69, 91-96.
- Calvo-Rathert, M., Goguitchaichvili, A., Bógalo, M.F., Vegas-Tubía, N., Carrancho, A., Sologashvili, J., 2011. A paleomagnetic and paleointensity study on Pleistocene and Pliocene basaltic flows from the Djavakheti Highland (Southern Georgia, Caucasus). *Phys. Earth Planet. Int.* 187, 212–224.
- Calvo-Rathert, M., Bógalo, M. F., Goguitchaichvili, A., Sologashvili, J. and Vashakidze, G., 2013. New paleomagnetic and paleointensity data from Pliocene lava flows from the Lesser Caucasus. *Journal of Asian Earth Sciences*, 73, 347–361.
- Camps, P., Ruffet, G., Scherbakov, V., Scherbakova, V. V., Prévot, M., Moussine-Pouchkin, A., Sholpo, L., Goguitchaichvili, A. & B. Asanidze, 1996. Paleomagnetic and geochronological study of a geomagnetic field reversal or excursion recorded in Pliocene volcanic rocks from Georgia (lesser Caucasus). *Phys. Earth Planet. Inter.*, 96, 41-59.
- Day, R., Fuller, M. and Schmidt, V. A., 1977. Hysteresis properties of titanomagnetites: Grain-size and compositional dependence. *Phys. Earth Planet. Int.*, 13, 260-267
- Goguitchaichvili, A., Sologachvili, D., Prévot, M., Calvo, M., Pavlenchvili, E.S.H., Maissuradze, G.M. & Schnepf, E., 1997. Paleomagnetic and rock-magnetic study of a Pliocene volcanic section in South Georgia(Caucasus). *Geologie en Mijnbouw*, 76, 135-143.



- Goguitchaichvili, A. & Parès, J. M., 2000. A recognition paleomagnetic study of volcanic and sedimentary rocks from Dmanisi (Caucasus): Implications for the oldest human occupation in Europe. *Compt. Rend. Acad. Sci. Paris*, 331, 183-186.
- Gogichaishvili, A., M. Calvo-Rathert, D. Sologashvili, L. Alva Valdivia & J. Urrutia-Fucugauchi, 2000. Paleomagnetic study of the Georgian Plio-Quaternary Volcanic Provinces (Southern Caucasus) A Pilot Study. *Compt. Rend. Acad. Sci. Paris, Vol. II*, 331-336
- Gogichaishvili, A., M. Calvo-Rathert, D. Sologashvili, J. Morales, A.M. Soler & M. Espinosa, 2001. A reconnaissance magnetostratigraphy of Georgian Plio-Quaternary Volcanic Provinces (Southern Caucasus). *Geofísica Internacional*, 40, 111-119.
- He, H.Y., Wang, X.L., Zhou, Z.H., Wang, F., Boven, A., Shi, G.H., and Zhu, R.X., 2004. Timing of the Jiufotang Formation (Jehol Group) in Liaoning, northeastern China and its implications. *Geophys. Res. Lett.*, 31 (12), L12605. doi:10.1029/2004GLO19790.
- Johnson, C. L., C. G. Constable, L. Tauxe, R. W. Barendregt, L. L. Brown, R. S. Coe, P. Layer, V. Mejia, N. D. Opdyke, B. S. Singer, H. Staudigel, and D. Stone, 2008. Recent investigations of the 0-5 Ma geomagnetic field recorded in lava flows. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9:Q04032, doi:10.1029/2007GC001696.
- Lawrence, K. P., C. G. Constable, C. L. Johnson, 2006. Paleosecular variation and the average geomagnetic field at $\pm 20^\circ$ latitude. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, doi:10.1029/2004GC000871.
- Lebedev V. A, Bubnov S. N., Dudauri O. Z., and Vashakidze G. T., 2008. Geochronology of Pliocene Volcanism in the Dzhavakheti Highland (the Lesser Caucasus). Part 1: Western Part of the Dzhavakheti Highland. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 2008. Pleiades Publishing. Vol. 16. No.2, 204-224
- McElhinny, M. W. and McFadden, P. L., 1997. Paleosecular variation over the past 5 Myr based on a new generalized database. *Geophys. J. Int.*, 131, 240-252.
- McFadden P., Merrill T. and McElhinny W., 1988. Dipole/Quadrupole Family Modeling of Paleosecular Variation. *J. Geophys. Res.*, V. 93, 11, 583-11,588.
- McFadden, P. L., R. Merrill, M. W. McElhinny and S. Lee, 1991. Reversals of the Earth's magnetic field and temporal variations of the dynamo families. *J. Geophys. Res.*, 96, 3923-3933.
- Rebaï, S., Philip, H., Dorbath, L., Borissoff, B., Haessler, H., A. Cisternas, 1993. Active tectonics in the Lesser Caucasus: Coexistence of compressive and extensional structures. *Tectonics*, No. 5, 1089-1114.