



## REGISTRO DE TRANSICIONES DE POLARIDAD EN COLADAS VOLCANICAS PLIOCENAS DE LA MESETA DE DJAVAKHETI (CÁUCASO MENOR): EL CASO DE LA SECUENCIA DE APNIA

E. M. Sánchez-Moreno<sup>1</sup>, M. Calvo-Rathert<sup>1</sup>, A. Gogichaishvili<sup>2</sup>, G. T. Vashakidze<sup>3</sup>, V. A. Lebedev<sup>4</sup>, A. Carrancho<sup>1</sup>, J.J. Villalaín<sup>1</sup>, A. Caccavari<sup>5</sup>, M. Devidze<sup>6</sup>, C. Principe<sup>7</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Física, EPS, Universidad de Burgos, 09006 Burgos, Spain

<sup>2</sup> Laboratorio Interinstitucional de Magnetismo Natural, IGUM-UNAM, 58990 Morelia, México

<sup>3</sup> Alexandre Janelidze Institute of Geology, Ivane Javakishvili Tbilisi State Univ., 0171 Tbilisi, Georgia.

<sup>4</sup> Institute of Geology of Ore Deposits, Petrog., Mineralogy and Geochem., RAS, 119017, Moscow, Russia.

<sup>5</sup> Instituto de Geofísica, UNAM, 04150, México D.F., México

<sup>6</sup> Mikheil Nodia Institute of Geophysics, Ivane Javakishvili Tbilisi state University, 0171 Tbilisi, Georgia

<sup>7</sup> Istituto di Geoscienze e Georisorse-CNR, Archaeomagnetic laboratory Villa Borbone, Viareggio, Italy

\*e-mail: emsanchez@ubu.es

### ABSTRACT

Paleomagnetism and rock magnetism experiments were carried out on the Pliocene Apnia sequence. This sequence consists of basaltic flows with K-Ar ages between  $3.70 \pm 0.20$  and  $3.09 \pm 0.10$  Ma, and is located in the western Djavakheti Highland, one of the most important volcanic regions of the Lesser Caucasus. Previous paleomagnetic studies on different sequences of the same region show that these materials offer a reliable and continuous record of changes in the Earth's magnetic field, both in direction and intensity. Rock magnetism suggests magnetite with different contents of titanium and a mixture of single-domain and multidomain grains as carriers of magnetization. Paleomagnetic measurements show 5 normal, 2 transitional and 13 reverse polarity flows. The average pole obtained for the normal-polarity flows yields  $\lambda = 72^\circ$ ,  $\phi = 319^\circ$ , and for the reverse-polarity ones  $\lambda = 75^\circ$ ,  $\phi = 126^\circ$ . Mean directions of normal and reverse polarity-flows are not antipodal and do not agree with the expected directions, the normal polarity group shows the greater disagreement. Scatter of virtual geomagnetic poles (VGPs) shows a value  $S_B = 23.77$  for normal polarity flows, and  $S_B = 19.52$  for reverse polarity flows, well above the expected value.

**Keywords:** rock-magnetism, paleomagnetism, paleosecular variation, Pliocene lavas flows, Caucasus

### RESUMEN

Se realizaron diferentes experimentos de magnetismo de rocas y paleomagnetismo en la secuencia de Apnia, constituida por coladas basálticas de entre  $3.70 \pm 0.20$  y  $3.09 \pm 0.10$  Ma. Esta secuencia está situada al oeste de la Meseta de Djavakheti, una de las más importantes regiones volcánicas del Cáucaso Menor. Anteriores estudios en diferentes secuencias de la misma región indican que estos materiales ofrecen un registro fiable y continuo de las variaciones del campo magnético terrestre, tanto en dirección como en intensidad. El magnetismo de rocas sugiere magnetita con diferentes contenidos en titanio y una mezcla de granos monodominio y multidominio, como portadores de la magnetización. A partir de las medidas paleomagnéticas se han obtenido polaridades normales en cinco coladas, transicionales en dos coladas e inversas en 13 coladas. El polo medio correspondiente a las normales es  $\lambda = 72^\circ$ ,  $\phi = 319^\circ$ , y para las inversas  $\lambda = 75^\circ$ ,  $\phi = 126^\circ$ . Podemos observar que las direcciones medias de las coladas de polaridad normal y las de polaridad inversa no son antipodales, ni coinciden con los valores esperados, siendo el grupo de polaridades normales el que más se aleja de éstos. El análisis de la variación paleosecular muestra valores

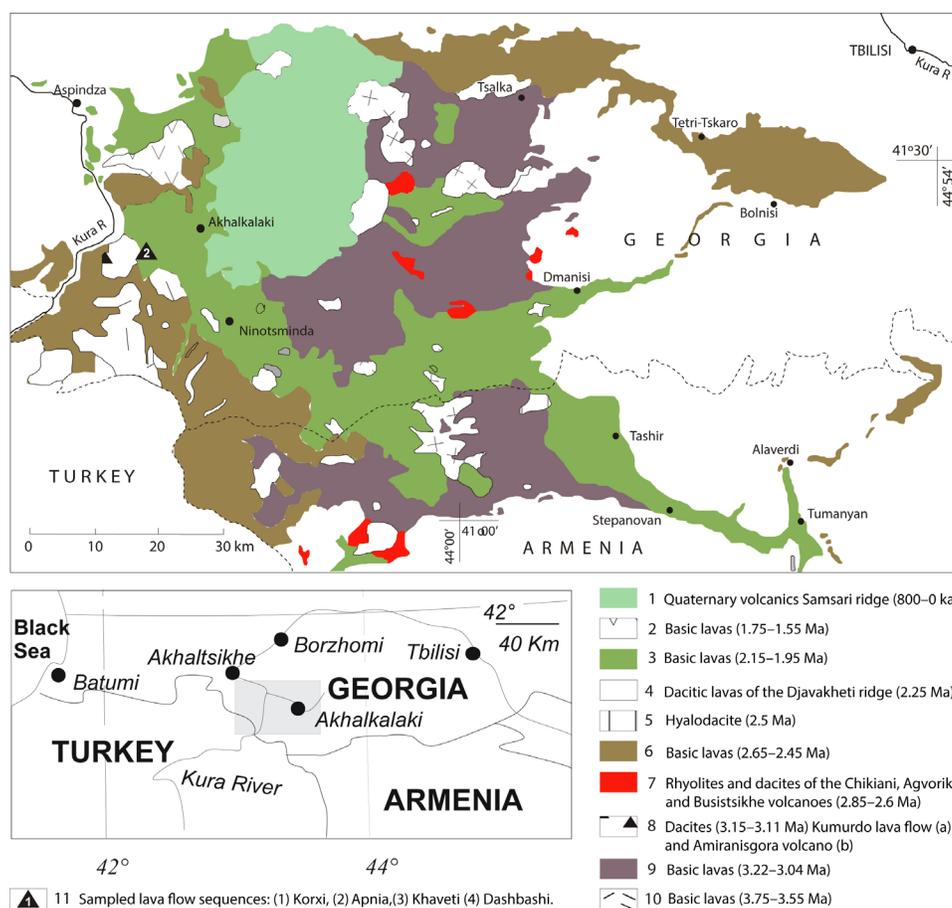


de dispersión angular de los polos geomagnético virtuales de  $S_B = 23.77$  para las polaridades normales y  $S_B = 19.52$  para las inversas, claramente superiores a los esperados.

**Palabras Clave:** magnetismo de rocas, paleomagnetismo, variación paleosecular, coladas volcánicas pliocenas, Cáucaso

**Introducción**

La región volcánica de la Meseta de Djavakheti (Sur de Georgia) proporciona materiales de gran interés para el estudio de las variaciones del campo magnético terrestre, tanto en su dirección como en su intensidad. (e.g. Goguitchaichvili *et al.*, 2009; Calvo-Rathert *et al.*, 2013). El tipo de vulcanismo ocurrido durante el Plio-pleistoceno, en cuanto periodicidad de las erupciones y características petrológicas, es el idóneo para obtener un registro fiel y continuo del comportamiento geomagnético para este período. Los datos paleomagnéticos y de paleointensidades en la Cordillera Caucásica son escasos, en comparación con otras zonas del cinturón Alpino. Antes de los 90 solo se pueden encontrar en bases de datos y en ruso. A partir de esta fecha ha habido un incremento de este tipo de estudios (Camps *et al.*, 1996; Goguitchaichvili *et al.*, 2009; Calvo-Rathert *et al.*, 2013; Caccavari *et al.*, 2014), que emplean una metodología moderna y de son de mayor fiabilidad, aunque su número todavía resulta limitado. Además del creciente interés por el registro paleomagnético en rocas volcánicas del sur Georgia, también es de gran importancia la existencia de estudios geocronológicos de dataciones K-Ar y de cartografía asociados a estas rocas (Lebedev *et al.*, 2008), que nos permiten situar en un contexto temporal y geológico los resultados paleomagnéticos.



**Figura 1:** Mapa del volcanismo Plioceno-Cuaternario en la meseta de Djavakheti, donde se muestra la situación de las secuencia de Apnia. Modificado de Lebedev *et al.*, 2008 y Calvo-Rathert *et al.*, 2013.



## Contexto geológico

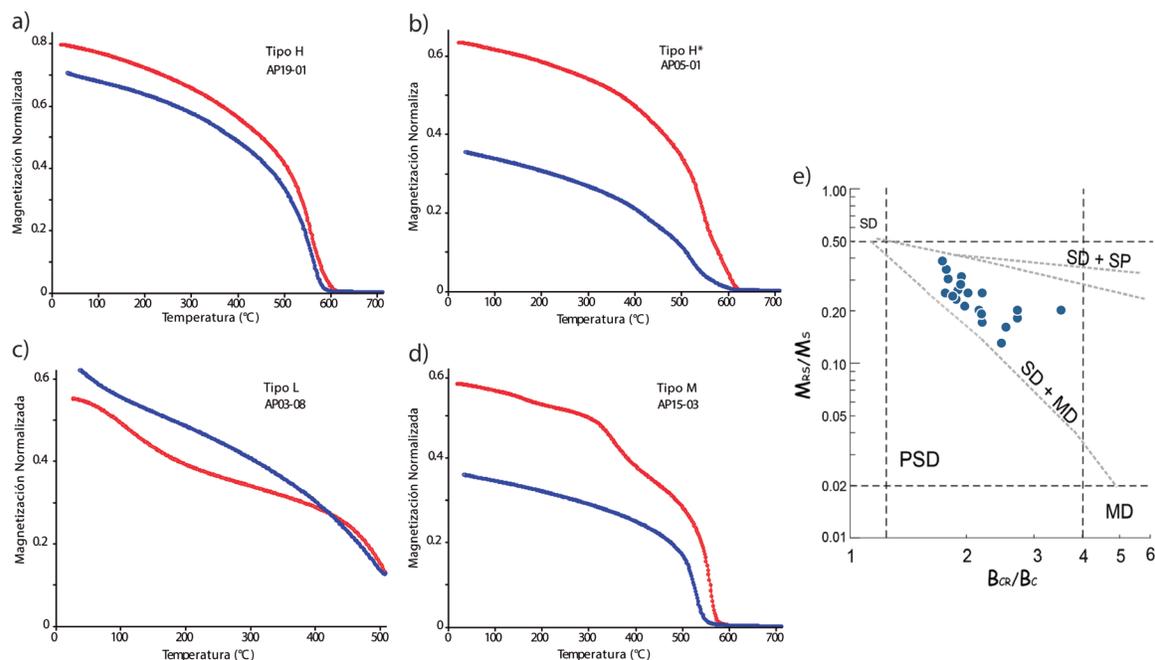
Las secuencias plio-pleistocenos estudiadas, se sitúan al Oeste de la Meseta de Djavakheti (Fig.1.), una de las más importantes regiones neovolcánicas del Cáucaso Menor. El sistema montañoso del Cáucaso pertenece al cinturón orogénico Caucásico-Arábigo (*e.g.* Sharkov *et al.*, 2014) formado por la, todavía activa, colisión de las placas Arábigo y Euroasiática, dentro del denominado Ciclo Alpino Tardío.

Las estructuras a través de las cuales se produce el acortamiento que acomoda la convergencia en el Cáucaso Menor, corresponden a diferentes sistemas de esfuerzos. Además de la orientación principal de compresión N-S, que genera pliegues y mantos de cabalgamiento W-E; se observa compresión NW-SE y NE-SW, con estructuras transtensionales-transpresionales (fallas direccionales sinestrasales NE-SW y dextrales NW-SE); y extensión E-W, con fallas normales N-S (Avagyan, 2010). Siendo las fallas direccionales las que controlan la cinemática reciente y actúan como conductos por donde asciende el magma durante el estadio postcolisional (Mioceno tardío-actualidad) (Adamia *et al.*, 2011), momento en el que se produce la mayor actividad volcánica subaérea, con al menos tres estadios magmáticos. Las rocas estudiadas se atribuyen al último estadio magmático (Plioceno superior-Holoceno) desarrollado en la meseta de Djavakheti y la plataforma de Armenia.

La secuencia estudiada (Fig.1.) se encuentra en la orilla derecha del río Kura, cerca de la localidad de Apnia, y cuenta con 20 coladas de basaltos toleíticos. Según Levedev *et al.*, 2008, las lavas superiores AP01 (YUG-21) y AP05 (YUG-26) tienen unas edades radiométricas (K-Ar) de  $3.09 \pm 0.10$  Ma y de  $3.28 \pm 0.10$  Ma, respectivamente. En la parte inferior de dicha secuencia, AP07 (YUG-28) y AP11 (YUG-30) presentan edades de  $3.75 \pm 0.25$  Ma y de  $3.70 \pm 0.20$  Ma.

## Magnetismo de rocas

Se han diferenciado cuatro tipos de comportamiento mediante las curvas termomagnéticas (fig.2.). (a)



**Figura 2:** Resultados de los experimentos de magnetismo de rocas. a), b), c) y d): Curvas termomagnéticas. e) Representación del cociente de la remanencia de saturación y la magnetización de saturación ( $M_{rs}/M_s$ ) en función del cociente de la coercitividad de la remanencia y la coercitividad ( $B_{cr}/B_c$ ) (según Day *et al.*, 1977).



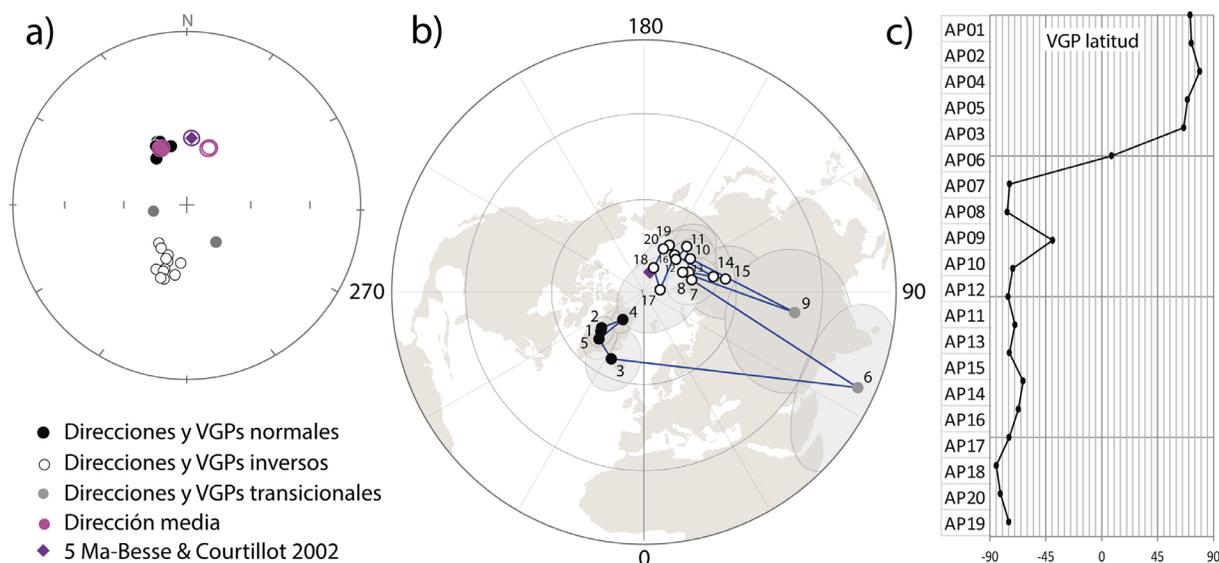
Tipo H: Muestran un comportamiento reversible con una única fase ferromagnética de alta temperatura ( $\approx 580^{\circ}\text{C}$ ) correspondiente a magnetita. (b) Tipo H\*: Al igual que en las anteriores, se observa una sola fase ferromagnética de alta temperatura. Presentan un comportamiento más irreversible que las distingue de las Tipo H. (c) Tipo L: Caracterizadas por un comportamiento irreversible y por la presencia de dos fases ferromagnéticas. Una de alta temperatura (magnetita) y otra de baja temperatura ( $\approx 200^{\circ}\text{C}$ ), que representa Ti-magnetita/Ti-maghemita con un alto contenido en titanio. (d) Tipo M: También muestran dos fases ferromagnéticas, la de alta temperatura, presente en todas las muestras, y otra de temperatura media ( $\approx 400\text{-}500^{\circ}\text{C}$ ), Ti-magnetita/Ti-maghemita con un menor contenido en titanio que en las Tipo L.

Las curvas de adquisición de la IRM y los ciclos de histéresis permiten observar que la saturación se alcanza a campos de baja intensidad, fases de baja coercitividad y la presencia de granos ferrimagnéticos. Los parámetros obtenidos en estos experimentos se han representado en el diagrama de Day (Day *et al.*, 1977; fig.2.e), donde se interpreta que las muestras estudiadas contienen una mezcla de partículas monodominio y multidominio (Dunlop, 2002).

### Paleomagnetismo

Se han desmagnetizado 156 especímenes mediante método térmico y 66 por campos alternos. Los resultados muestran una única componente paleomagnética en la mayoría de los casos, y a menudo una débil componente viscosa actual. La dirección de la ChRM de cada flujo se ha determinado con 10 especímenes de media, obteniendo 6 direcciones normales y 14 inversas (Fig.3.a). El grupo de polaridades normales tiene una dirección media  $D = 336^{\circ}$ ,  $I = 60^{\circ}$ ,  $\alpha_{95} = 3.9^{\circ}$  y  $k = 303.4$  y el de las inversas  $D = 200^{\circ}$ ,  $I = -61^{\circ}$ ,  $\alpha_{95} = 3.1^{\circ}$  y  $k = 166$ . Al comparar la dirección media de cada grupo con la dirección esperada obtenida de la curva sintética de deriva polar aparente europea para los últimos 5 Ma propuesta por Besse y Courtillot (2002), y recalculada para la longitud y latitud del sitio, ninguna coincide. En el caso del grupo de direcciones inversas, la media se separa de la dirección esperada un ángulo de  $8.5^{\circ}$  y en el de normales,  $14.5^{\circ}$ .

A partir del cálculo de los polos geomagnéticos virtuales (VGP) de cada colada, se han obtenido 5 polaridades



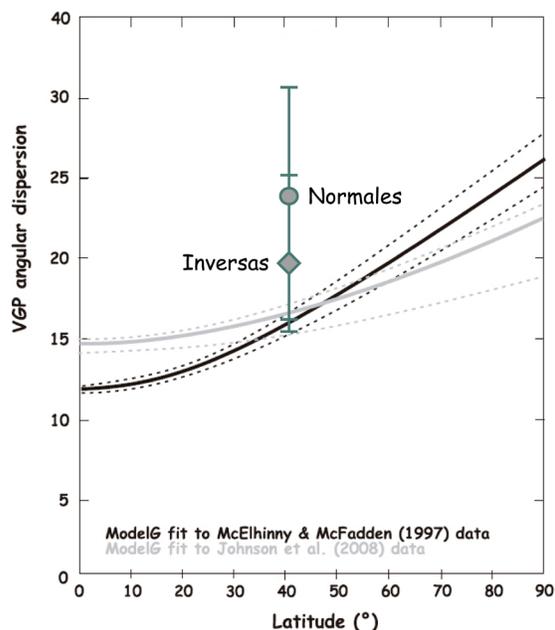
**Figura 3:** Resultados paleomagnéticos. a) Representación estereográfica de las direcciones promediadas de cada colada, donde se ha calculado la media para cada población de direcciones normales e inversas y su comparación con la dirección esperada recalculada para el sitio de muestreo. b) Proyección de los VGPs obtenidos y sus trayectorias, junto con el polo esperado para los últimos 5 Ma en Europa. c) Latitud de los VGPs por orden estratigráfico.



normales, 13 inversas y 2 transicionales (Fig.3.b y c). El polo paleomagnético medio, descartando las transicionales, para las polaridades normales es  $\lambda = 7^\circ$ ,  $\varphi = 319^\circ$ , ( $D_p = 4.4^\circ$  y  $D_m = 5.9^\circ$ ), y para las inversas  $\lambda = 75^\circ$ ,  $\varphi = 126^\circ$ , ( $D_p = 3.6^\circ$  y  $D_m = 4.7^\circ$ ). La dirección media de las coladas con polaridades normales también muestra una mayor distancia respecto a la esperada, con un ángulo de  $21.5^\circ$ , mientras que la dirección media de las inversas aparece más cercana a ésta, con  $12.2^\circ$ .

### Variación paleosecular (PSV)

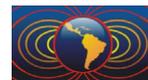
Por último, se ha calculado la dispersión angular de los VGPs. Para ello no se ha tenido en cuenta el polo obtenido para la colada transicional AP06 ( $\lambda = 8^\circ$ ,  $\varphi = 66^\circ$ ). Por el contrario la segunda colada transicional AP09 ( $\lambda = 40^\circ$ ,  $\varphi = 82^\circ$ ), sí que se han incluido en los cálculos por presentar un polo de valor muy a una polaridad inversa. Los resultados se han comparado con el Modelo G de PSV en lavas de los últimos 5 Ma, de McElhinny y McFadden (1997) y Johnson *et al.* (2008) (fig.4.). Las polaridades normales muestran unos valores de dispersión angular de  $S_B = 23.77$ ,  $S_{sup} = 31.24$  y  $S_{inf} = 16.62$ ; y las inversas  $S_B = 19.52$ ,  $S_{sup} = 25.65$  y  $S_{inf} = 15.50$ . Ambos grupos se alejan de la curva de dispersión propuesta, siendo el de polaridad normal el que más se aleja de lo esperado, sugiriendo que la variación secular no está promediada.



**Figura 4:** Dispersión angular de los VGPs, agrupados por polaridades normales (circulo) e inversas (rombo), comparada con el Modelo G de latitud de la variación paleosecular en lavas (PSVLs) durante los últimos 5 Ma (McElhinny y McFadden, 1997 (en negro), y Johnson *et al.*, 2008 (en gris)).

### Conclusiones

Los resultados paleomagnéticos obtenidos muestran el registro de un cambio de polaridad con 13 coladas con polaridades inversas, 2 transicionales y 5 normales. Se ha calculado la dirección media para los grupos de coladas normales e inversas, y podemos observar que no existe antipodalidad entre ellos. Al comparar la polaridad media de cada uno de ellos con la polaridad esperada, no coinciden, siendo el grupo de polaridades normales el más distante. El análisis de la dispersión angular también arroja valores por encima de los esperados. Estos resultados pueden, señalar probablemente una inestabilidad en la dirección del campo magnético debida a un descenso en la intensidad del dipolo axial, proceso previo a una inversión de polaridad completa. Esta última interpretación se ve apoyada por los resultados de magnetismo de roca, que hacen fiable el registro de magnetización obtenido. Es probable que la transición de Apnia corresponda a un evento geomagnético dentro del cron Gauss. En este momento se están realizando medidas de la determinación absoluta de la paleointensidad por diferentes métodos y los resultados que se esperan obtener podrían confirmar que la secuencia de Apnia ha registrado la magnetización previa a un cambio de polaridad completo.



### Agradecimientos:

Este trabajo se financió con el proyecto CGL2012-32149 (*Ministerio de Economía y Competitividad, España*) y el *Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER)*.

### Referencias

- 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.
- Avagyan, A., Sosson, M., Karakhanian, A., Philip, H., Rebai, S., Rolland, Y., Melkonyan, R., Davtyan, V., 2010. Recent tectonic stress evolution in the Lesser Caucasus and adjacent regions. *Geological Society, London, Special Publications 2010; v. 340*; p. 393-408
- Besse, J. and 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*.
- Caccavari, A., Calvo-Rathert, M., Gogitchaichvili, A., He, H., Vashakidze, G., Vegas, N., 2014. Paleomagnetism of the  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age of a Pliocene lava flow sequence in the lesser Caucasus: record of a clockwise rotation and analysis of paleosecular variation. *Geophys. J. Int., 197*, 1354-1370.
- 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. & Schmidt, V. A., 1977. Hysteresis properties of titanomagnetites: Grain-size and compositional dependence. *Phys. Earth planet. Int., 13*, 260–267.
- Dunlop, D., 2002. Theory and application of the Day plot (Mrs/Ms versus Hcr/Hc) 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data. *J. Geophys. Res., 107 (B3)*.
- Goguitchaichvili A., Cervantes, M. A., Calvo-Rathert, M., Camps, P., Sologashvili, J., Maissuradze, G., 2009. Gilbert-Gauss Geomagnetic Reversal Recorded in Pliocene Volcanic Sequences from Lesser Caucasus: Revisited, *Earth, Planets and Space, 61*, 71-82.
- Johnson, C. L., Constable, C. G., Tauxe, L., Barendregt, R. W., Brown, L. L., Coe, R. S., Layer, P., Mejia, V., Opdyke, N. D., Singer, B. S., Staudigel, H., Stone, D., 2008. Recent investigations of the 0–5 Ma geomagnetic field recorded in lava flows. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 9, 4. Q04032. <http://dx.doi.org/10.1029/2007GC001696>
- Lebedev, V. A., Bubnov, S. N., Dudaauri, O. Z., G. T. Vashakidze, 2008a. Geochronology of Pliocene Volcanism in the Dzhavakheti Highland (the Lesser Caucasus). Part 1: Western Part of the Dzhavakheti Highland. *Stratigraphy and Geological Correlation, 16 (5)*, 204-224.
- McElhinny, M. W. & McFadden, P. L., 1997. Paleosecular variation over the past 5 Myr based on a new generalized database, *Geophys. J. Int., 131*, 240–252.
- Sharkov, E., Lebedev, V., Chugaev A., Zabarinskaya L., Rodnikov A., Sergeeva N., Safonova, I., 2014. The Caucasian-Arabian segment of the Alpine-Himalayan collisional belt: Geology, volcanism and neotectonics. *Geoscience Frontiers 1-11, article in press*.