



15 AÑOS DE INVESTIGACIONES PALEOMAGNÉTICAS Y DE PALEOINTENSIDAD EN GEORGIA (CÁUCASO)

Manuel Calvo-Rathert^{1*}, Avto Gogichaishvili², Jemal Sologashvili³, Goga Vashakidze⁴

¹Departamento de Física, EPS, Universidad de Burgos, c/ Francisco de Vitoria, s/n, 09006 Burgos, España

²Laboratorio Interinstitucional de Magnetismo Natural, UNAM, Campus Morelia, 58098, México

³Caucasus International University, Chargali St. 63, 380192 Tbilisi, Georgia

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

Resumen

Se presentan en este trabajo los resultados de investigaciones de magnetismo de las rocas, paleomagnetismo y paleointensidad llevadas a cabo por el grupo investigador durante los últimos 15 años en secuencias de coladas volcánicas y sedimentos de origen volcanogénico de edad Pleistocena y Pliocena de la República de Georgia (Cáucaso). Los trabajos realizados en muestras provenientes de la meseta de Djavakheti, la cuenca de Khrami y de Kazbegi han estado principalmente dirigidos al estudio de las variaciones del campo magnético terrestre y el arqueomagnetismo.

Introducción

Hasta hace unos años y, a pesar de su indudable interés, el Cáucaso era una de las regiones del cinturón Alpino con una mayor escasez de datos paleomagnéticos fiables (Bazhenov y Burtman, 2002). Aunque se habían realizado diversos estudios de este tipo en dicha región, muchos databan de hacía varias décadas, y a menudo la metodología empleada (por ejemplo, resultados basados en muestras sin desmagnetizar o en una única etapa de desmagnetización) impedía que muchos resultados obtenidos fueran aceptables, ya que no cumplían los criterios mínimos de calidad y fiabilidad exigidos en la actualidad para los resultados paleomagnéticos. Por otra parte, por regla general, esos resultados solamente se publicaban en bases de datos (p. ej., Khramov, 1984) y en ruso, haciéndolos prácticamente inaccesibles a la comunidad científica internacional. Por este motivo resultaba del mayor interés contar con nuevos datos paleomagnéticos de esta región, pertenecientes a distintas edades geológicas, que permitieran aportar nueva información tanto a la evolución tectónica de del Cáucaso como a la variación del campo magnético terrestre con el tiempo, la datación arqueomagnética u otros posibles objetivos de investigaciones paleomagnéticas.

La magnetización remanente de las rocas no sólo proporciona información acerca de la dirección del campo magnético terrestre que la creó, sino también puede hacerlo de su intensidad. Los datos de paleointensidad son de especial utilidad en el área del geomagnetismo, ya que las variaciones de los valores absolutos de la paleointensidad en el tiempo pueden aportar, información de gran importancia sobre la evolución de la corteza terrestre y el límite corteza-manto (Prévot et al., 1990; Prévot y Perrin, 1992). Como se desprende de la base de datos de resultados de paleointensidad (Perrin y Schnepf, 2004), los datos de paleointensidad de que se dispone aún son escasos y se hallan distribuidos de manera poco uniforme, tanto espacial como temporalmente. Aunque se cuente con aproximadamente 1000 datos para el último millón de años, sólo se dispone de 48 datos por millón años en el periodo comprendido entre 1 y 20 millones de años, y de 3 por millón de años para el periodo comprendido entre 20 y 400 Ma. El número de determinaciones obtenidas de unidades más antiguas es incluso inferior. Esto se debe al hecho de que la determinación de la paleointensidad sea experimentalmente mucho más compleja que la determinación de las direcciones paleomagnéticas y a que, con una tasa de éxito en las determinaciones muy inferior a la de estudios direccionales. La dispersión que se observa en los resultados de paleointensidad es, por regla general, mucho mayor que la de los resultados paleomagnéticos, a menudo debido a que determinaciones incorrectas sean erróneamente consideradas como valores correctos de la paleointensidad (por ejemplo, Calvo et al., 2002).



Si se considera, por otra parte, la distribución geográfica de las determinaciones de paleointensidad disponibles, se puede constatar que ésta se caracteriza por una gran asimetría, ya que la escasez de datos fiables procedentes de muchas regiones, como por ejemplo de la antigua Unión Soviética, es manifiesta. Sin embargo, para una descripción fidedigna de las variaciones temporales del campo magnético terrestre es indispensable un conocimiento menos sesgado de sus características, incluyéndose entre éstas no solamente sus variaciones en función del tiempo, sino también aquéllas relacionadas con la posición geográfica de las unidades estudiadas. Por ello, y con el fin de obtener una imagen fidedigna y menos sesgada del campo geomagnético es necesaria una mayor cantidad de datos de paleointensidad. Dada la escasez de datos correspondientes al territorio de la antigua Unión Soviética, el extenso vulcanismo de diferentes épocas que se halla en el Cáucaso constituye un objetivo de gran interés para el estudio de la paleointensidad y la ampliación de la base de datos disponible.

Contexto geológico y tectónico

La formación de las cordilleras del Cáucaso se halla relacionada con la convergencia, aún activa, de las placas Euroasiática y Arábiga. Debido a su complejo desarrollo, el Cáucaso es un interesante ejemplo de deformación continental, que puede analizarse con ayuda del paleomagnetismo. De forma esquemática, las principales etapas de su evolución son las siguientes (por ejemplo, Philip *et al.*, 1989):

- Subducción del Tethys durante el Jurásico, Cretácico y Paleogeno al sur del actual pequeño Cáucaso, con desarrollo de una cuenca de retroarco al sur de la Plataforma Rusa y con un arco volcánico activo en el límite sur de la cuenca.
- Desplazamiento de la subducción al límite norte de la cuenca marginal después del cierre del Tethys (hace aproximadamente 20Ma.), desarrollándose un vulcanismo de tipo calco-alcalino al norte de esta nueva subducción. Cierre de la cuenca marginal al norte del actual pequeño Cáucaso en el Plioceno medio e inicio de la colisión continental.
- Colisión continental que continúa en la actualidad. Importancia de fallas inversas con componente strike-slip. Como consecuencia de esta colisión, la región comprendida entre el borde norte del bloque Arábigo y la placa Euroasiática se comprime, mientras que de forma simultánea se produce la eyección del Bloque Anatólico hacia el Oeste y del bloque Iraní hacia el Este (por ejemplo, Philip *et al.*, 1989; Rebaï *et al.*, 1993).

La actividad tectónica del Cáucaso tiene lugar en un contexto complejo, en el cual se observa una asociación de estructuras compresivas N-S (pliegues y cabalgamientos) y extensionales E-W (fallas normales y diques) (Rebaï *et al.*, 1993), acompañada de una actividad volcánica continua, al menos desde el Jurásico hasta la actualidad (por ejemplo, Rebaï *et al.*, 1993).

El magmatismo Neógeno-Cuaternario del Cáucaso también se halla asociado con la colisión de las placas Euroasiática y Arábiga (Koronovskii y Demina, 1999). Comenzó en el Mioceno medio y continúa aún en la actualidad, ya que existe constancia de erupciones volcánicas en tiempos históricos (por ejemplo, Aydar *et al.*, 2003). Milanowski y Koronovski (1973) distinguen tres etapas diferenciadas en la evolución del magmatismo Neógeno-Cuaternario del Cáucaso: i) Desde el Mioceno superior al Plioceno inferior, ii) desde el Plioceno medio o superior al Pleistoceno y iii) durante el Cuaternario.

Revisión de datos

Inicialmente se planteó una recopilación y revisión de datos paleomagnéticos y de paleointensidad ya existentes, con el fin de reconocer y clasificar sus características y establecer la idoneidad de las litologías estudiadas para futuras investigaciones paleomagnéticas más detalladas. (Gogichaishvili *et al.*, 2000; Gogichaishvili *et al.*, 2001). Para ello se volvieron a analizar los resultados obtenidos en 248 coladas volcánicas y tres estratos sedimentarios intercalados de edad Plio-Cuaternaria de tres regiones volcánicas distintas de la República de Georgia: Djavakheti, la cuenca de Khrami y Kazbegi (Fig. 1). Asimismo se llevaron a cabo experimentos de magnetismo de las rocas y de paleointensidad: Se midió la susceptibilidad en función de la temperatura y se determinaron los parámetros de la curva de histéresis en muestras seleccionadas. Las 28 determinaciones de paleointensidad realizadas mediante el método de Thellier (Thellier y Thellier, 1959), proporcionaron resultados considerados fiables en 17 casos.



En las muestras seleccionadas para estudios termomagnéticos, se reconocieron dos tipos de comportamiento: La mayor parte de las curvas mostraron un desarrollo reversible, con titanomagnetita pobre en titanio como único componente ferromagnético, mientras que en algunos casos se observaron curvas irreversibles con dos fases en la curva de calentamiento ($T_{C1} < 400^{\circ}\text{C}$ y $T_{C2} \approx 570^{\circ}\text{C}$) y titanomagnetita pobre en titanio en la de enfriamiento. Como resultado de la comparación de los cocientes 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) se observa que la mayoría de las coladas muestra una estructura pseudodominio (PSD), que puede corresponder a una mezcla de muestras (SD) monodominio y (MD) multidominio.



Figura 1. Foto satélite del Cáucaso (tomada de Google Earth) con zonas de muestreo en la República de Georgia. Mediante recuadros se indican, de forma esquemática, la meseta de Djavakheti (1), la cuenca de Khrami (2) y Kazbegi(3).

La desmagnetización térmica y por campos alternos de muestras piloto de estas coladas muestra un comportamiento simple, con un único componente paleo-magnético en el 70% de los casos. El principal problema del conjunto de datos reevaluado se halla en el bajo número de muestras estudiado en cada colada, ya que sólo se disponía

de datos procedentes de 501 especímenes, es decir, de 1 a 3 por colada, inferior al mínimo requerido para poder considerar los datos como fiables y de calidad. Se reconocieron tanto polaridades normales como inversas, y en algunos casos, intermedias. Excluyendo éstas últimas y las coladas con una única muestra, se pudo apreciar que la dirección media obtenida ($D = 6.0^{\circ}$; $I = 57.8^{\circ}$, $k = 30$; $\alpha_{95} = 3.8^{\circ}$) no difería de la dirección Plio-Cuaternaria esperada para Georgia en el momento del estudio ($D = 4.9^{\circ}$; $I = 59.8^{\circ}$; Sologashvili, 1986). Tampoco se observaron rotaciones con respecto a la dirección esperada en ninguna de las tres regiones estudiadas. Los resultados obtenidos establecieron una magnetoestratigrafía preliminar de las provincias volcánicas georgianas.

Estudio de secuencias volcánicas Pliocenas de la meseta de Akhalkalaki

Camps et al. (1996) llevaron a cabo un

Akhalkalaki

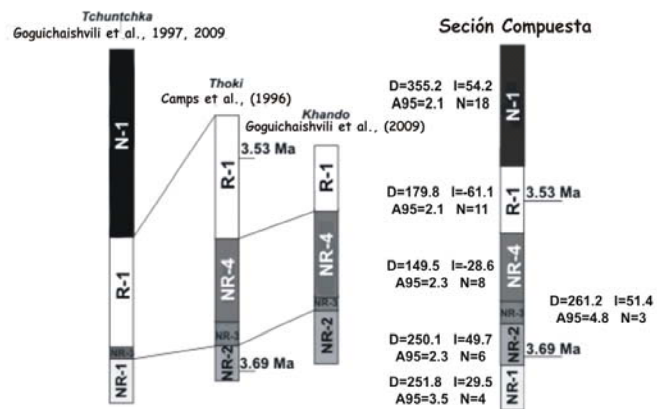


Figura 2.- Sección compuesta de Akhalkalaki (formada por las secciones de Tchuntchka, Thoki y Xando)



estudio paleomagnético y de paleointensidad en la secuencia de Thoki (Fig. 1), situada en la meseta de Akhalkalaki y realizaron dos dataciones mediante el método Ar-Ar en muestras de plagioclasa de dicha secuencia, obteniendo edades de 3.7 y 3.5 Ma. La secuencia consta de una sección inferior y otra superior, separadas por una superficie de erosión. En la base hallaron 16 coladas consecutivas (3 grupos direccionales) de polaridad intermedia, mientras que todas las coladas superiores poseían polaridad inversa. Las paleointensidades de las coladas de polaridad intermedia eran extraordinariamente bajas ($<10\mu\text{T}$), e incluso los valores de las inversas seguían siendo bajos, aunque en menor medida. Los autores interpretaron sus resultados como el registro parcial de una excursión o de la parte superior de la transición Gilbert-Cochiti.

Goguitaichvili et al. (1997) desarrollaron un nuevo estudio paleomagnético en el sector superior de una secuencia adyacente (Tchunchka) (Fig. 1), obteniendo polaridades normales en la parte más alta de la misma e inversas en las coladas inferiores. Los resultados paleomagnéticos y las características petrográficas permitieron establecer una correlación magnetoestratigráfica preliminar entre las secuencias de Thoki y Tchunchka. Una posterior estudio paleomagnético y de paleointensidad (Goguitaichvili et al., 2009) permitió completar el muestreo de la secuencia de Tchunchka en su parte inferior y recoger muestras de la cercana secuencia de coladas volcánicas de Xando (fig. 1). Los resultados obtenidos revelaron que 14 coladas (6 de la parte inferior de Tchunchka y 8 de Xando) eran de polaridad intermedia y las 8 coladas de la secuencia superior de Xando de polaridad inversa.

A partir de la correlación entre las tres secuencias y del análisis de todos los resultados paleomagnéticos y de paleointensidad obtenidos en estos estudios, se pudo establecer una nueva estratigrafía magnética (fig. 2): El sector inferior de la secuencia compuesta consiste de coladas con un registro de polaridad intermedia seguido de otro sector de gran espesor constituido por coladas de polaridad inversa. La parte superior de la secuencia está formada por coladas de polaridad normal. Las dataciones radiométricas disponibles indican que probablemente la secuencia estudiada registre la transición (inversa-normal) Gilbert-Gauss. En ese caso, las coladas de polaridad intermedia de la base de la secuencia constituyan un precursor a la transición.

Estudio de otras secuencias de coladas Pleistocenas y Pliocenas de la meseta de Djavakheti

Con el fin de contribuir al conocimiento de las variaciones del campo magnético terrestre, en una nueva investigación paleomagnética llevada a cabo principalmente en rocas del Este de la meseta de Dzavakheti se estudiaron muestras de cuatro secuencias de coladas volcánicas (Calvo-Rathert et al., 2011) (fig. 1): La secuencia de Mashavera, de 1,8 a 2,5 Ma de edad, (11 coladas), la sección de Kvemo Orozmani (4 coladas), de la misma edad que la de Mashavera y la sección de Zemo-Karabulakhi (3 coladas) de 2,5 a 2,6 Ma de edad. En el Oeste de la región se muestreo la secuencia de Diliska, en la cual la edad de las coladas varía entre 3,3 y 2,1 Ma.

Se llevaron a cabo diversos experimentos de magnetismo (medición curvas termomagnéticas, determinación de los parámetros de la curva de histéresis, análisis de curvas de adquisición de remanencia isoterma –IRM–). Las curvas de magnetización en función de la temperatura mostraron, en la mayor parte de los casos, un comportamiento simple, con titanomagnetita baja en Ti como único portador de la remanencia y con un alto grado de reversibilidad. Sin embargo, un 30% de las curvas presentó una trayectoria irreversible, mostrando dos fases en la curva de calentamiento y sólo una (magnetita) en la de enfriamiento.

Por otra parte, el análisis paleomagnético mostró la presencia de una única componente en la mayoría de las coladas, principalmente en la secuencia de Mashavera, y de dos componentes, superpuestos en mayor o menor medida, en algunos otros casos. Se pudo aislar una componente característica en todas excepto en dos coladas, obteniéndose una polaridad positiva en todos menos en un caso. Se analizó la dispersión de los polos geomagnéticos virtuales (PGV) de todas las coladas de edad Pleistocena, observándose que se ajustaban al modelo G (McFadden et al., 1988) de variación latitudinal de PGVs. El mismo análisis aplicado a la secuencia de Mashavera mostró una dispersión ligeramente inferior.

Los experimentos de paleointensidad se realizaron con el método de Coe. Se obtuvieron resultados satisfactorios en 25 de 84 muestras, principalmente de la secuencia de Mashavera. La paleointensidad de la mayor parte de las cola-



das oscila entre 30 y 45 μT , de acuerdo con lo esperado para intensidades Pliocenas o Pleistocenas. Sin embargo, dos coladas de la parte superior de la secuencia muestran valores superiores a 60 μT . Estas intensidades anómalas junto con las altas inclinaciones observadas en la secuencia de Mashavera podrían ser interpretadas como un posible precursor del comienzo próximo de la transición Olduvai-Matuyama.

Nuevos resultados paleomagnéticos del yacimiento Dmanisi

El yacimiento prehistórico de Dmanisi (fig. 1) es conocido porque en él se han hallado restos humanos y evidencia de industria lítica asociados con fauna Plio-Pleistocena. Las dataciones radiométricas mediante K/Ar y $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ y los estudios paleomagnéticos llevados a cabo hasta el momento asignan a las unidades que contienen los mencionados hallazgos una edad máxima de 1.8 M.a. El yacimiento paleoantropológico está formado por sedimentos de origen volcánogenético de edad Plio-Pleistocena superpuestos a una sucesión de coladas basálticas. La secuencia litoestratigráfica del yacimiento comprende dos unidades deposicionales básicas: La unidad A, que se halla directamente sobre el basamento volcánico y la unidad B, emplazada sobre la unidad A. Entre ambas se halla una capa formada por una concreción calcárea.

Se llevó a cabo un estudio paleomagnéticos y de magnetismo de las rocas en 106 muestras de secciones continuas del yacimiento prehistórico (unidades A y B y capa de concreción calcárea) y de la colada volcánica subyacente (Calvo-Rathert et al., Los experimentos paleomagnéticos y de magnetismo de las rocas realizados incluían la desimanación térmica y por campos alternos de 94 muestras así como registros de curvas termomagnéticas (k-T), experimentos de adquisición y desmagnetización de remanencia isoterma (IRM) y estudios de anisotropía de la susceptibilidad magnética (ASM). La colada basáltica y todas las muestras de la unidad A se caracterizan por poseer polaridades normales, mientras que en la capa de concreción calcárea se reconocen polaridades inversas. La unidad B se caracteriza por la presencia de direcciones inversas junto con otras de carácter anómalo. Se han interpretado éstas últimas como consecuencia de la coexistencia en las muestras afectadas de un componente inverso y otro secundario normal, ambos con espectros de temperaturas y campos de desbloqueo similares. Esta interpretación se ve apoyada por los resultados de los experimentos de ASM.

La parte inferior de la secuencia aparece claramente asociada al cron Olduvai, mientras que la edad de la parte superior está menos definida, siendo superior a 1,07 Ma. Como los restos humanos se han hallado en unidades caracterizadas tanto por polaridades normales como inversas y muestran ciertas diferencias entre sí, los resultados paleomagnéticos del estudio parecen apuntar hacia la posibilidad de dos ocupaciones humanas diferentes en momentos distintos en el yacimiento de Dmanisi.

Agradecimientos:

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto BU004A09 de la Junta de Castilla y León.

Referencias

Aydar, E., Gourgaud, A., Ulusoy, I., Digonnet, F., Labazuy, P., Sen, E., Bayhan, H., Kurtas, T. y A.U. Toluoglu, 2003. Morphological analysis of active mount Nemrut stratovolcano, eastern Turkey: evidences and possible impact areas of future eruption. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 123, 301-312.

Bazhenov, M. y Burtman, V., 2002. Eocene paleomagnetism of the Caucasus (southwest Georgia): oroclinal bending in the Arabian syntaxis. *Tectonophysics*, 344, 247-259.

Calvo, M., Prévot, M., Perrin, M. y Riisager, J., 2002. Investigating the reasons for the failure of paleointensity experiments: A study on historical lava flows from Mt. Etna. *Geophys. J. Int.*, 149, 44-63.



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 paleo-anthropologic site (southern Georgia, Caucasus). *Quaternary Research* 69, 91-96.

Calvo-Rathert, M., A. Goguitchaichvili, M.F. Bógalo, N. Vegas-Tubía, A. Carrancho y J. Sologashvili (2011, en prensa). A Paleomagnetic and Paleointensity Study on Pleistocene and Pliocene Basaltic Flows from the Djavakheti Highland (Southern Georgia, Caucasus). *Physics of the Earth and Planetary Interiors*.

Camps, P., Ruffet, G., Scherbakov, V., Scherbakova, V.V., Prévot, M., Moussine-Pouchkin, A., Sholpo, L., Goguitchaichvili, A. y 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.

Goguitchaichvili, A., Sologashvili, D., Prévot, M., Calvo, M., Pavlenchvili, E.S.H., Maissuradze, G.M. y 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. and 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, J. Morales, A.M. Soler and M. Espinosa, (2001). A reconnaissance magnetostratigraphy of Georgian Plio-Quaternary Volcanic Provinces (Southern Caucasus). *Geofísica Internacional*, 40, 111-119.

Goguitchaichvili A., M. A. Cervantes, M. Calvo-Rathert, P. Camps, J. Sologashvili and G. Maissuradze (2009). Gilbert-Gauss Geomagnetic Reversal Recorded in Pliocene Volcanic Sequences from Lesser Caucasus: Revisited, *Earth, Planets and Space*, Vol 61, 71-82.

Khramov, A.N. (Ed.), 1984. Paleomagnetic directions and pole positions (data for the USSR): Summary catalogue 1. Akad. Nauk SSSR, Moscú, 94 pp. (en ruso).

Koronovskii, N.V. y L.I. Demina, 1999. Collision stage of the evolution of the Caucasian sector of the Alpine fold-belt: Geodynamics and magmatism. *Geotectonics*, 33, 102-118.

McFadden P., Merrill T. and McElhinny W. (1988). Dipole/Quadrupole Family Modeling of Paleosecular Variation. *J. Geophys. Res.*, V. 93, 11,583-11,588.

Milanovskii, E.E. y N.V. Koronovskii, 1973. Orogenic volcanism and tectonics of the Alpine belt in Eurasia, Nedra, Moscú (en ruso).

Philip, H., Cisternas, A., Gvishiani, A. y A. Gorshkov, 1989. The Caucasus: An actual example of the initial stages of continental collision. *Tectonophysics*, 161, 1-21.

Perrin, M. y Schnepf, E., 2004. IAGA paleointensity database: distribution and quality of the data set, *Phys. Earth planet. Inter.*, 147, 255-267

Prévot, M., Derder, M.M., McWilliams, M. y Thompson, J., 1990. Intensity of the Earth's magnetic field: Evidence for a Mesozoic dipole low, *Earth Planet Sci. Lett.*, 97, 129-139.

Prévot, M. y Perrin, M., 1992. Intensity of the Earth's magnetic field since Precambrian from Thellier-type paleointensity data and inferences on the thermal history of the core, *Geophys. J. Int.*, 108, 613-620.



Rebã, S., Philip, H., Dorbath, L., Borissoff, B., Haessler, H. and A. Cisternas, 1993. Active tectonics in the Lesser Caucasus: Coexistence of compressive and extensional structures. *Tectonics*, No. 5, 1089-1114.

Sologashvili, D., 1986. Paleomagnetism of Neogene volcanic formations of Georgia. PhD Thesis, University of Tbilisi; 168pp (en ruso).

Theilier, E. y O. Theilier (1959). Sur l'intensité du champ magnetique terrestre dans le passé historique et geologique, *Ann. Geophys.*, 15, 285-376.