ESTUDIO PALEOMAGNÉTICO DE VARIACIÓN SECULAR SOBRE FLUJOS DE LAVA FECHADOS POR Ar-Ar DEL ÁREA DE TACÁMBARO (MICHOACÁN, MÉXICO); PRIMERA EVIDENCIA VOLCÁNICA DE LA EXCURSIÓN GEOMAGNÉTICA INTRA-JARAMILLO

Rafael Maciel Peña[1*], Avto Goguitchaichvili[2,5], Marie-Noëlle Guilbaud[3], Vicente Carlos Ruíz Martínez[4], Manuel Calvo Rather[5], Sánchez Leda[6], Claus Siebe[3], Bertha Aguilar Reyes[2] y Juan Morales[2]

[1] Laboratorio Interinstitucional de Magnetismo Natural, Sede Tacámbaro, Instituto Tecnológico Superior de Tacámbaro, Michoacán.

[21] Laboratorio Interinstitucional de Magnetismo Natural, Instituto de Geofísica-Sede Michoacán, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia, México.

[3] Departamento de Vulcanología, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, 04510, México D.F. México.

[4] Departamento de Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica I, Universidad Complutense de Madrid, Madrid España.

[5] Departamento de Física, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Burgos, E-09001 Burgos, España.

[6] Departamento de Geología, Área Geofísica-Geotectónica, Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

RESUMEN

Este estudio presenta nuevos resultados paleomagneticos de 37 flujos de lava pertenecientes al Campo Volcánico Michoacán Guanajuato. Las edades de los sitios muestreados van de los 32 Ma a la actualidad (Guilbaud *et al.* 2012). Se logró aislar la componente primaria de la magnetización para 34 sitios, obteniendose una dirección media es I = 33°, D = 353°, k = 57, α_{95} = 3.4°. Esta dirección concuerda con la esperada paleodirección para el Plio-Cuaternario. La variación paleosecular se estimo a partir de la variación del polo virtual geomagnético y se obtuvo S_F = 13.7 con S_U = 16.5 y S_L = 11.82 (límite superior e inferior respectivamente), lo cual corresponde a lo establecido en el modelo G de McFadden (1988 y 1991) y con el modelo de Johnson et al (2008) para los ultimos 5 Ma.

Palabras clave: Variación Secular, Paleomagnetismo, Excursión Geomagnética, Magnetismo de Rocas, Campo Promediado en Tiempo, Magnetoestratigrafía, Plio-Plioceno, Centro de México.

ABSTRACT

This study presents new paleomagnetic results from 37 independent cooling units in Michoacán-Guanajuato Volcanic Field (MGVF) in western México). The available ages range from 32 Ma to < 5000 yrs BC (Guilbaud *et al.* 2012). The characteristic paleodirections are successfully isolated for 34 lava flows. The mean paleodirection obtained in this study is I = 33°, D = 353°, k = 57, α_{95} = 3.4°, N = 34. These directions are practically undistinguishable from the expected Plio-Quaternary paleodirections. The paleosecular variation is estimated through the study of the scatter of virtual geomagnetic poles giving S_F = 13.7 with S_U = 16.5 and S_L = 11.82 (upper and lower limits respectively) which reasonably agree with the model G of McFadden et al. (1988, 1991) fit to the Johnson et al. (2008) databases for the last 5 Ma.

Keywords: Paleosecular Variation, Paleomagnetism, Geomagnetic Excursión, Rock-Magnetism, Time Averaged Field, Magnetostratigraphy, Plio-Pleistocene, Central Mexico

Introducción

La morfología del Campo Magnético Terrestre (CMT) se conoce por datos obtenidos de observaciones magnéticas y mediciones satelitales, y se sabe que este campo no es estático; tanto la dirección como la intensidad varian con el tiempo. El estudio de las variaciones espaciales y temporales del CMT y la naturaleza del campo promediado en tiempo son los temas centrales para cualquier investigación paleomagnética. Estos estudios permiten la investigación de los procesos del geodínamo, aplicaciones tectónicas y estratigráficas, y variación secular. Una de las principales características del CMT es que cambia su polaridad en intervalos de tiempo irregulares, así la duración de los intervalos de polaridad geomagnética es bastante variable, oscila entre algunas decenas de miles y varios millones de años (por ejemplo, Merril y McFadden, 1999). Por lo tanto, las inversiones geomagnéticas proporcionan un medio eficaz de correlación estratigráfica y fechamiento. Se tienen registros de excursiones de polaridad breves durante los últimos dos crones. Se han descubierto numerosas excursiones geomagnéticas en los crones Brunhes y Matuyama (por ejemplo, Singer et al, 2002.; Laj y Channell, 2007). Su número, sin embargo, es todavía un tema de debate. Laj y Channell (2007), por ejemplo, consideran que en el cron de Brunhes sólo existen siete excursiones, mientras que otras cinco aún necesitan la ratificación, ya sea en la definición de los datos magnéticos o en los datos de fechamiento. Singer *et al*. (2002) propone el desarrollo de una escala de tiempo geomagnética (GITS) para Brunhes y finales del Matuyama.

Las rocas volcánicas aportan un registro del campo magnético de la Tierra a través de la adquisición de magnetización termoremanente (TRM), pero se esta a expensas de las erupciones volcánicas, las cuales proporcionan un registro discontinuo, tanto cronológicamente como espacial. El estudio paleomagnético de flujos de lava pueden ser de gran interés para el conocimiento de las características y variaciones del campo geomagnético antiguo. Pero debe de ser complementado por dataciones radiométricas precisas.

Esta investigación tiene como objetivo contribuir a los estudios de variación paleosecular de baja latitud, así como a la escala magnetoestratigráfica para los ultimos 5 Ma, basado en un estudio de magnetismo de roca y paleomagnetismo de 37 unidades volcánicas (más de 350 muestras paleomagnéticas) asociadas al Campo Volcánico Michoacán Guanajuato (MGVF). Las edades disponibles van desde 32 Ma a < 5,000 AC (Guilbaud et al. 2012).

Geología

La Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) es un arco continental relacionado con la subducción de las placas de Cocos y Rivera por debajo de la placa Norteamericana. Una característica de la faja es el gran número de volcanes pequeños (> 3,000) y pocos volcanes grandes. La densidad de pequeños volcanes varía ampliamente en todo el arco para alcanzar valores máximos en la parte centro-oeste, donde se forma el Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato (CVMG). Este campo de aproximadamente 40,000 km^2, con límites poco definidos consta de un gran número (> 1,000) de pequeñas construcciones volcánicas que varían de conos de escoria, escudos, maar y flujos de lava no asociados a conos (Hasenaka y Carmichael, 1985, 1987; Guilbaud *et al.* 2011, 2012). La mayoría de estos volcanes son del tipo monogenetico. Pero también existe un estratovolcan, el volcán Tancitaro y dos volcanes históricos, como son el Paricutín (1943-1952) y el Jorullo (1759-1774), que se encuentran en el límite del arco a través de la falla sísmica Chapala -Oaxaca (Guilbaud *et al*. 2011).

Muestreo

El muestreo se realizó en la zona centro y suroeste del estado de Michoacán (ver fig. 1), para la zona cercana al volcán Jorullo, se muestrearon sitios con edad disponible (Guilbaud *et al*. 2011), de fácil acceso y aparentemente sin alteración, en total se obtuvieron 111 muestras orientadas pertenecientes a 10 flujos de lava. Y para la región Tacámbaro se obtuvieron 260 muestras de 27 flujos de lava independientes con edad disponible y de fácil acceso.

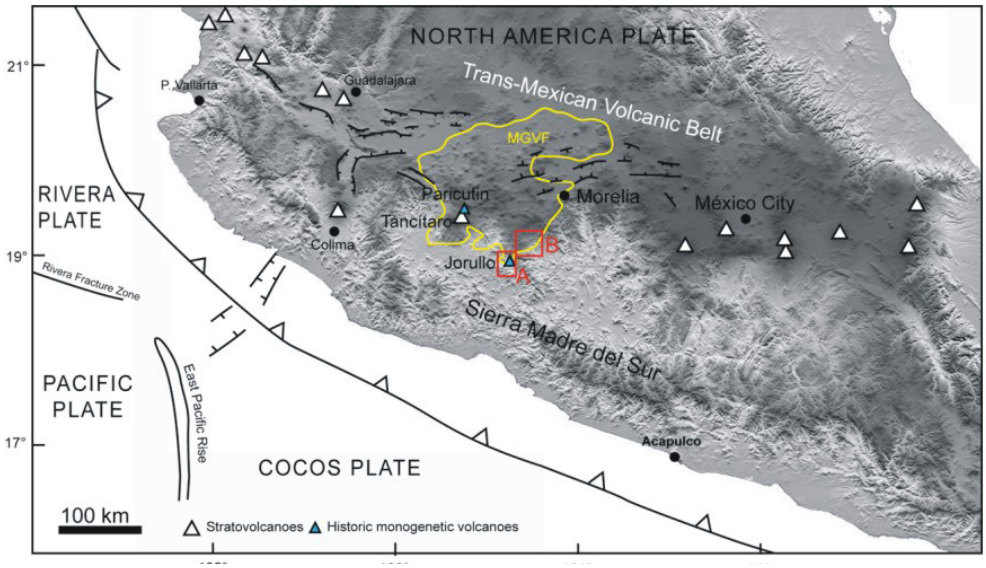

Figura 1. Faja Volcanica Transmexicana, donde se resalta en amarillo el campo Volcánico Michoacán Guanajuato y en rojo se muestra las zonas de estudio: A) Jorullo y B) Tacámbaro.

Metodología

Con el fin de identificar los portadores magnéticos responsables de la magnetización remanente y para obtener información acerca de su estabilidad paleomagnética, se realizaron varios experimentos de magnetismo de roca. Estos experimentos incluyeron: a) mediciones de saturación de magnetización remanente *vs* temperatura, denominadas curvas Js-T; b) mediciones de susceptibilidad en baja y alta temperatura; c) experimentos de histéresis; y d) magnetización remanente isotermal (IRM).

La susceptibilidad a baja temperatura (de aproximadamente -185° C a temperatura ambiente) se registró usando un medidor de susceptibilidad Kappabridge-KLY3 (AGICO) equipado con horno. Los experimentos de histéresis, IRM y susceptibilidad se llevaron a cabo utilizando una Balanza de Translación de Campo Variable (VFTB) en la Universidad Politécnica de Burgos (España). Para estas mediciones, se realizó la siguiente secuencia de medidas: (i) la adquisición de IRM de saturación, (ii), la curva de histéresis y (iii) la curva de J_S-T.

La Magnetización remanente se midió con un magnetómetro de giro JR-6 en el laboratorio Interinstitucional de Magnetismo Natural (LIMNA) del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México campus Morelia Michoacán, México. En todos los sitios, se seleccionaron dos muestras piloto para la desmagnetización térmica y dos para desmagnetización por campos alternos, y el análisis de los resultados de desmagnetización permitió la elección de la técnica de desmagnetización más adecuada para cada sitio. En la desmagnetización alterna se sometieron las muestras hasta 95 mT y se llevaron a cabo con un desmagnetizador Molspin y la desmagnetización térmica se llevo desde temperatura ambiente hasta 575° C ó 675° C en un horno TD-48 de ASC.

Resultados

La dirección media de los sitios de polaridad inversa arrojaron los siguientes valores: declinación D = 174.7º, la inclinación I = -30.8 º, (n = 7, $\alpha 95$ = 7.9º, k = 59) mientras que los sitios normales proporcionan los siguientes resultados: Declinación D = 352.5º, inclinación I = 33.6º, (n = 27, $\alpha 95$ = 3.9º, k = 56). La

dirección media considerando sitios normales e invertidos es: D = 353.0º, I = 33.0º, (n = 34, α95 = 3,4 º, k = 57). Esta dirección está en perfecto acuerdo con la paleodirección prevista para el Plio-Pleistoceno, como se deriva de los polos de referencia dados por Besse y Courtillot (2002) para América del Norte (véase también Alva-Valdivia *et al*., 2000). Por lo tanto, nuestros resultados, junto con los estudios anteriores sobre la misma región (Maciel *et al*. 2009 y 2011) sugieren que no se observa rotación de bloques en el área de estudio.

Para la realización de este estudio se contó con datos de fechamiento por $^{40}Ar/^{39}Ar$ y ^{14}C obtenidos de Guilbaud et al, 2011, 2012. Para todos los sitios excepto uno de los sitios más jóvenes pertenecen a la localidad de Tacámbaro. Así se tienen edades desde el presente hasta 5 Ma. Para los sitios pertenecientes al cron Brunhes en 17 casos se pudo determinar una dirección característica normal (fig. 2). Y como era de esperar, y los sitios Jo-15 y Jo-17 (Jorullo), así como los sitios de Tac-11 y Tac-12 (Tacámbaro) produjeron direcciones de polaridad inversa, que está de acuerdo con su correlación con el cron Matuyama.

El sitio de polaridad normal Tac-13 con edad 0.96 ± 0.07 fechado por $^{40}Ar/^{39}Ar$ (fig. 2) coincide inequívocamente con el subcrón Jaramillo (C1r.1n). En el sitio de Jo-17, ocurre algo similar, este sitio con una edad de 1.03 ± 0.02 Ma con polaridad normal y esta inversión se puede atribuir a la excursión intra Jaramillo (por ejemplo, Laj y Channell, 2007). Esta excursión se ha detectado en la secuencia de Jingbian loess en el norte de China (Guo *et al*., 2002), en los núcleos marinos de Nueva Zelanda (Pillans *et al*., 1994) y en los sitios de PAO 983 y 984, donde fueron correlacionados con isótopos marinos de 30 a 1.048 Ma (Channell y Kleiven, 2000; Channell *et al*, 2002). Los resultados del sitio de Jo-17 proveen una primera evidencia de la excursión Intra-Jaramillo en rocas volcánicas. Cabe señalar que ambas muestras paleomagnéticas tanto Tac-13 y JO-17 se tomaron muy cerca (< 100 m) a las muestras fechadas Ar-Ar, con esto se excluye cualquier posible error relacionado con la toma de muestras.

Las muestras correspondientes a los sitios Tac-08 y Tac-07 mostraron edades de $^{40}Ar/^{39}Ar$ bastante similares (1.64 ± 0.04 Ma para Tac-08; 1.70 ± 0.02 Ma para Tac-07), el sitioTac-08 está ubicado muy cerca de la muestra radiométricamente fechada, mientras Tac-07 (flujo de lava) se encuentra a 2 km de la muestra fechada (bomba volcánica), pero ambos materiales (la bomba y la lava) pertenecen a el mismo volcán monogenético (Cerro Petembo). Curiosamente, las fechamientos por $^{40}Ar/^{39}Ar$ colocan ambos sitios en el cron Matuyama (de polaridad invertida), pero en estos sitios se obtuvo polaridad normal. Si se tiene en

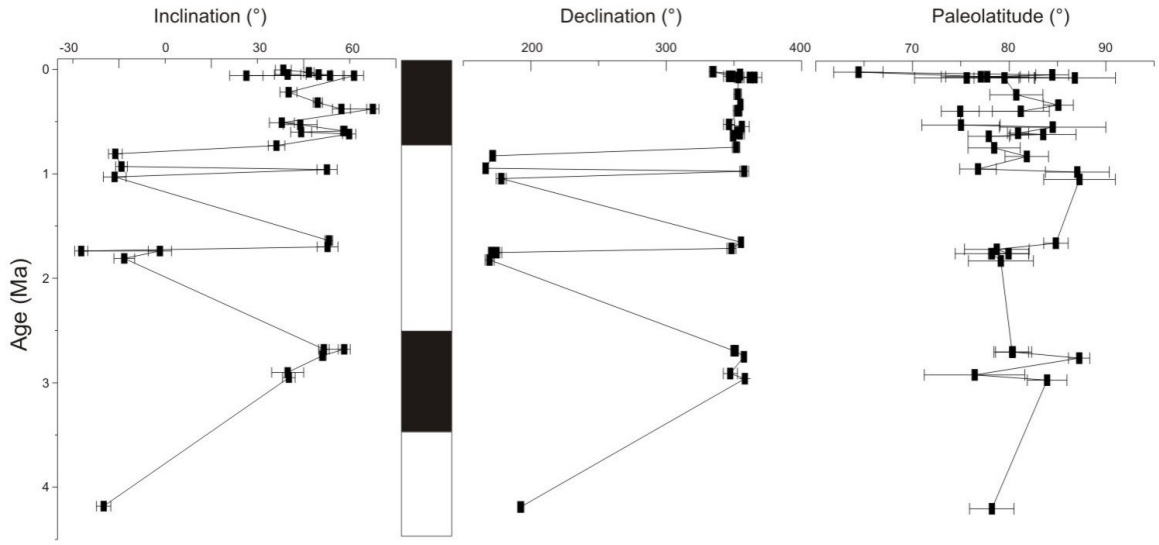

Figura 2. Inclinación magnética, declinación y paleolatitud del polo geomagnético virtual

cuenta la incertidumbre del fechamiento por $^{40}Ar/^{39}Ar$ de sitio Tac-08 (± 0.04 Ma), y si se considera el hecho de que esta incertidumbre es del orden de 10 ka, la edad $^{40}Ar/^{39}Ar$ de sitio Tac-08 sería compatible con la correlación de la polaridad con la obtenida en excursión Gilsa, que duró 1.567 - 1.575 Ma (ver por ejemplo, Laj y Channell, 2007).

El sitio de polaridad normal Tac-07, sin embargo, no puede ser correlacionado con cualquier intervalo de polaridad normal en su rango de edad. Como no se han detectado excursiones hasta el momento entre la excursión Gilsa y Olduvai (1.778 - 1.945 Ma, ver por ejemplo, Gradstein *et al*, 2004), y no hay problemas con las mediciones paleomagnéticas y la interpretación de este sitio, la incompatibilidad entre los resultados paleomagnéticos y el fechamiento tienen que ser atribuidos a la edad $^{40}Ar/^{39}Ar$ disponible, y la polaridad de la magnetización observada se pueden probablemente correlacionar con el subcron mas cercano que es Olduvai (C2N).

Por otra parte el sitio Tac-20, de edad 1.81 ± 0.02 Ma y polaridad inversa, proporciona resultados contradictorios, como la edad obtenida corresponde al subcron de polaridad normal Olduvai. Sin embargo, si se aplican argumentos similares al sitio Tac-07, es decir la incertidumbre del fechamiento (± 0.02 Ma), y como es del orden de 10 kyr , la edad del sitio Tac-20 podría estar correlacionada con el subcron C1r.3r (del cron Matuyama), que duró 1.185 - 1.778 Ma (ver por ejemplo, Gradstein, 2004).

Agradecimientos

Al financiamiento otorgado por el Instituto Tecnológico Superior de Tacámbaro en el proyecto “Estudio Paleomagnético Integral de los Flujos de Lava Asociado al Campo Volcánico Michoacán Guanajuato”, dentro de la línea de investigación Magnetismo Natural con clave de registro STACA-IGEO-LMN-2013-01.

Referencias

Alva-Valdivia, L., Urrutia-Fucugauchi, J., Goguitchaichvili, A. T. and Dunlop, D., 2000. Magnetic mineralogy and properties of Peña Colorada Iron-Ore deposits, GuereroTerrane: Implications to magnetometric modeling, Special issue on the Guerrero terrane: *J. South Amer. Earth. Sci., v. 13, no. 5*, 415-428.

Besse, J., and Courtillot, V., 2002. Apparent and true polar wander and the Geometry of the magnetic Field in the last 200 Million Years: *Journal Geophysical Research, 107(B11)*, 2300, doi: 10.1029/2000JB000050.

Channell, J. E. T. and Kleiven, H. F., 2000. Geomagnetic paleointensities and astrochronological ages for the Matuyama-Brunhes boundary and the boundaries of the Jaramillo Subchron: Paleomagnetic and oxygen isotope records from ODP site 983. *Phil. Trans. R. Soc. A*, *358*, 1027-1047.

Channell, J. E. T., Mazaud, A., Sullivan, P., Turner, S., Raymo, M. E., 2002. Geomagnetic excursions and paleointensities in the Matuyama Chron at Ocean Drilling Program Sites 983 and 984 (Iceland Basin). *J. Geophys. Res.*, *107*, (B6), 10.1029/2001JB000491

Guilbaud M.-N., Siebe C., Layer P., Salinas S., Castro-Govea R., Garduño-Monroy V. H., Le Corvec N., 2011. Geology, geochronology and tectonic setting of the Jorullo Volcano Region, Michoacán México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research No.201*, 97-12.

Guilbaud M.-N., Siebe C., Layer P., Salinas S., 2012, Reconstruction of the volcanic history of the Tacámbaro-Puruarán area (Michoacán México) reveals high frequency of Holocene monogenetic eruptions. *Bulletin of Vulcanology, v. 74, issue 5*, 1187-1211.

Gradstein, F. M., Ogg, J. G. and Smith, A. G., 2004. A Geologic Time Scale 2004. Cambridge University Press, 589 p.

Guo, B., Zhu, R., Florindo, F. Ding, Z., Sun, J.A. 2002. A short reverse polarity interval within the Jaramillo subchron. Evidence from the Jingbian section, northern China Loess plateau. *J. Geophys. Res.*, *107*, 10029-10040.

Hasenaka, T., Carmichael, I. S. E., 1987. The cinder cones of Michoacán-Guanajuato, central Mexico: petrology and chemistry. *Journal of Petrology, 28 (2)*, 241-269.

Hasenaka**,** T., I. S. Carmichael, 1985. A compilation of location, size, and geomorphological parameters of

volcanoes of the Michoacan- Guanajuato volcanic field, central Mexico, *GeofisicaInternacional, 24 (4)*, 577–607.

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, 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.

Laj, C. and Channell, J.E.T., 2007). Geomagnetic excursions. In: Kono, M. (Ed.), Treatise in Geophysics, vol. 5, Elsevier, pp. 373-416.

Maciel-Peña R., Goguitchaichvili A., Garduño-Monroy V. H., Ruiz Martinez V. C., Aguilar-Reyes A., Morales J., Alva-Valdivia L., Caballero-Miranda, C., Urrutia-Fucugauchi J., 2009, Paleomagnetic and Rock-magnetic survey of Brunhes lava flows from Tancitaro volcano, México, *Geofisica Internacional 48 (4)*.

Maciel Peña R., Goguitchaichvili A., Henry B., Sanchez-Bettucci L., Morales J., Aguilar Reyes B., Soler-Arechalde A. M., Calvo-Rathert M., 2011. PlioPleistocenePaleomagnetic Record from the Michoacan-Guanajuato, Monogenetic Volcanic Field (Western Mexico). *Stud. Geophys. Geod., 55*, 311-328 Inst. Geophys. AS CR, Praga.

McElhinny, M. W., McFadden, P. L., 1997. Palaeosecular variation over the past 5 Myr based on a new generalized database, *Geophys. J. Int., 131*, 240–252.

McFadden P., Merrill T., McElhinny W., 1988, Dipole/Quadrupole Family Modeling of Paleosecular Variation. *Journal of Geophysical Research, V. 93, 11*,583-11,588.

McFadden, P. L., Lowes, F. J., 1981.The discrimination of mean directions drawn from Fisher distributions, *Geophys. J. R. astr.* Soc., 67, 19-33.

Merril R. T., McFadden P. L., 1999. Geomagnetic polarity transitions, *Geophys., 372*, 201-226.

Pillans, B. J., Roberts, A. P., Wilson, G. S., Abbott, S. T., Alloway, B. V., 1994. Magnetostratigraphic, Lithostratigraphic and tephrostratigraphic constraints on Lower and Middle Pleistocene sea-level changes, Wanganui Basin, New Zeeland. *Earth and Planetary Science Letters 121*, 81-98.

Singer, B. S., M. K. Rellle, K. A. Hoffman, A. Battle, C. Laj, H. Guillou, J. C. Carracdeo, 2002. Ar/Ar ages from transitionally magnetized lavs on La Palma, Canary Islands, and the geomagnetic instability timescale, *J. Geophys. Res., 107 (B11)*, 2307, doi:10.1029/2001JB001613.