

Erwan Bourdon^{1,4}
Jean-Philippe Eissen^{1,4}
Marc-André Gutscher²
Michel Monzier³
Minard L. Hall⁴
Joseph Cotten²

RESPUESTA MAGMÁTICA A LA SUBDUCCIÓN DE UNA CORDILLERA ASÍSMICA: EL CASO DE LA MARGEN ECUATORIANA

- 1 IRD, Whympers 442 y Coruña, casilla 17-12-857, Quito, Ecuador. (ebourdon@ird.fr), (eissen@ird.fr).
- 2 IUEM, Place N. Copernic, 29280 Plouzané, Francia.
- 3 IRD y LMV, 5 Rue Kessler 63038 Clermont-Ferrand Cedex, Francia.
- 4 Instituto Geofísico/ Departamento de Geofísica, Escuela Politécnica Nacional, Quito.

Resumen

La respuesta magmática a la subducción de la cordillera asísmica de Carnegie bajo el continente sudamericano a la latitud del Ecuador, es estudiada sobre un corte petrológico de oeste a este a través de los volcanes Pichincha, Antisana y Sumaco. Un modelo de transición hacia una subducción horizontal permite sugerir un cambio progresivo de un magmatismo calco-alcálico "normal" (como en Colombia) hasta un magmatismo que incluye magmas adakíticos en la parte oeste del corte, que resultan de la fusión parcial de la corteza oceánica subducida, y magmas que resultan de la fusión parcial de un manto metasomatizado con fluidos adakíticos en la parte central y este de este corte.

Abstract

The magmatic response of the subduction of the aseismic Carnegie Ridge beneath the South American continent at the latitude of Ecuador is studied by a petrologic swath from the west to the east, including the volcanoes Pichincha, Antisana and Sumaco. A transition model from a horizontal subduction, which permits the suggestion of a progressive change in "normal" calc-alkaline magmatism (like to the north in Colombia) to a magmatism which include adakites in the western part of the swath, that results from the partial fusion of the subducted oceanic crust and magmas which result from the partial fusion of the metasomatized mantle with adakitic fluids in the central and eastern part of the swath.

e.bourdon@gl.rhul.ac.uk

INTRODUCCIÓN

A lo largo de la margen sudamericana, la subducción de las cordilleras asísmicas de gran flotabilidad, como la de Nazca o de Juan Fernández, provocan la interrupción del volcanismo activo en superficie debido a la horizontalización de la placa subducida y la desaparición del prisma de manto astenosférico.

Frente a las costas del Ecuador se encuentra en subducción la cordillera asísmica de Carnegie, producida por la actividad del punto caliente de Galápagos. Sin embargo, este proceso no se ha traducido en una desaparición del volcanismo activo y por el contrario hay un ensanchamiento considerable del arco activo así como su significativo acercamiento a la fosa de subducción.

Estudios recientes han propuesto tres hipótesis completamente opuestas para la formación de los magmas en Ecuador, estas son:

- La fusión parcial de la corteza oceánica subducida (Hormann y Pichler, 1982);
- La fusión parcial de la corteza continental (Killian *et al.*, 1995, Arculus *et al.*, 1999);
- La fusión parcial del manto sub-continental sin ninguna participación de la corteza continental (Barragán *et al.*, 1998).

Sobre la base de la paradoja que parece ser la presencia del volcanismo activo en Ecuador, y el conflicto de las tres hipótesis de formación de los magmas, ini-

ciamos un estudio petrológico, geoquímico e isotópico sobre tres volcanes, utilizando un corte a través de la cordillera ecuatoriana, en el que se involucran a los volcanes Pichincha, Antisana y Sumaco. Este estudio ha mostrado la naturaleza excepcional del magmatismo ecuatoriano, el cual relacionamos con la situación geodinámica de la margen ecuatoriana (es decir, con la subducción de la cordillera de Carnegie).

CORTE PETROLÓGICO A TRAVÉS DE LA ZONA VOLCÁNICA NORTE (NVZ SIGLAS EN INGLÉS) DE LOS ANDES

El volcán Pichincha: fusión parcial de la corteza oceánica y metasomatismo del manto

Ubicado en el ante-arco, las lavas del volcán Pichincha presentan todas las características geoquímicas e isotópicas de los productos de fusión parcial de la corteza oceánica (Bourdon *et al.*, 2002a). Estos magmas originales fueron llamados “adakitas” por Defant y Drummond (1990) en homenaje al trabajo de Kay (1978) realizado en estos magmas en la isla de Adak (Aleutianas). Estas rocas de composición intermedia a ácida presentan como particularidades geoquímicas altas concentraciones en Na_2O , enriquecimiento en potasio reducido, concentraciones anormalmente bajas en tierras raras pesadas e Itrio y altas concentraciones en estroncio. Esto se traduce en razones $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$, La/Yb y Sr/Y anormalmente elevadas para rocas calco-alkalinas clásicas (figura 1). Además, presentan firmas isotópicas cercanas a las de los basaltos alterados de las dorsales oceánicas. Sugiriendo con estas características geoquímicas, que las adakitas son producidas directamente por la fusión parcial de la corteza oceánica, metamorfozada en facies de anfibolita con granate. A partir de la petrología experimental se ha demostrado que se puede obtener líquidos experimentales muy parecidos a las adakitas naturales a partir de un protolito basáltico en la “ventana” presión-temperatura 1-2 GPa y 700-900 °C (correspondiente a condiciones de formación de los magmas en posición ante-arco). Sin embargo, las rocas del Pichincha presentan también composiciones químicas de andesitas magnesianas. La presencia de este tipo de magmas sugiere la interacción de las adakitas originales durante su ascenso hasta la superficie con el manto peridotítico. Los trabajos de petrología experimental así como el estudio de los xenolitos del manto en zonas donde se encuentran adakitas, muestran que esta interacción se traduce en la formación en el manto de minerales metasomáticos como el granate, el anfíbol pargasítico y la flogopita (Carroll y Wyllie, 1989; Prouteau *et al.*, 2001). En contraparte, el líquido que reacciona con el manto se encuentra enrique-

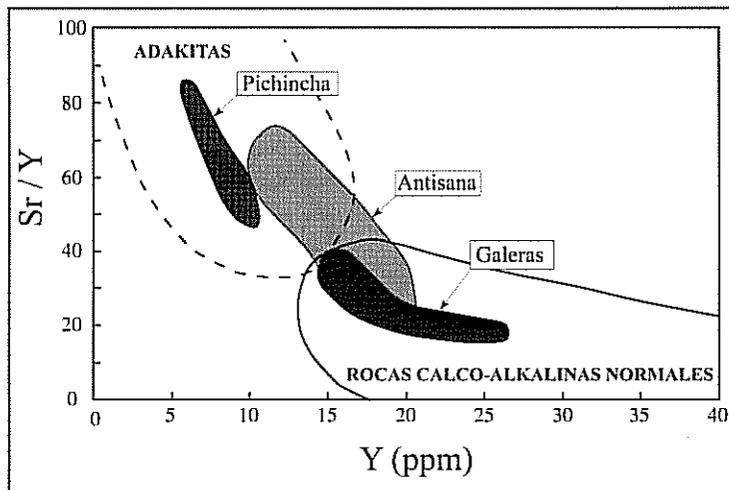


Figura 1. Diagrama de discriminación Sr/Y versus Y para las adakitas del Volcán Pichincha, la rocas similares a adakitas del volcán Antisana y las rocas calcoalkalinas “normales” del volcán Galeras, Colombia (C. Robin, com. pers.). Tomado de Bourdon *et al.*, 2002b.

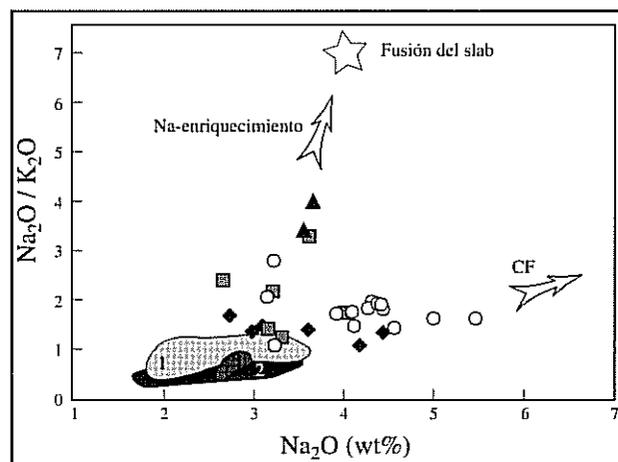


Figura 2. Diagrama $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ versus Na_2O mostrando el enriquecimiento en Na de los HNB del Sumaco (círculos), de Baja California y Costa Rica (cuadrados) y de Kamchatka-este (rombos), respecto a las shoshonitas más clásicas de Fidji (1), Kamchatka-oeste (2) y Argentina (3). A pesar de no ser lavas shoshoníticas, los Nb-Enriched Basalts de Filipinas (triángulos) han sido también reportados en este diagrama. CF indica el tren normal de cristalización fraccional. Todas las lavas tienen $\text{MgO} > 4.75\%$. Tomado de Bourdon *et al.* 2002c.

cido en MgO y empobrecido en SiO_2 , pareciéndose a una andesita magnesiánica. En este caso, los magmas adakíticos en la zona de subducción del Ecuador serían los principales productos de metasomatismo del prisma mantélico, como fue sugerido para otras zonas de subducción del globo, tales como en Kamtchaka o en Filipinas (Kepezhinskias *et al.*, 1996; Sajona *et al.*, 1994).

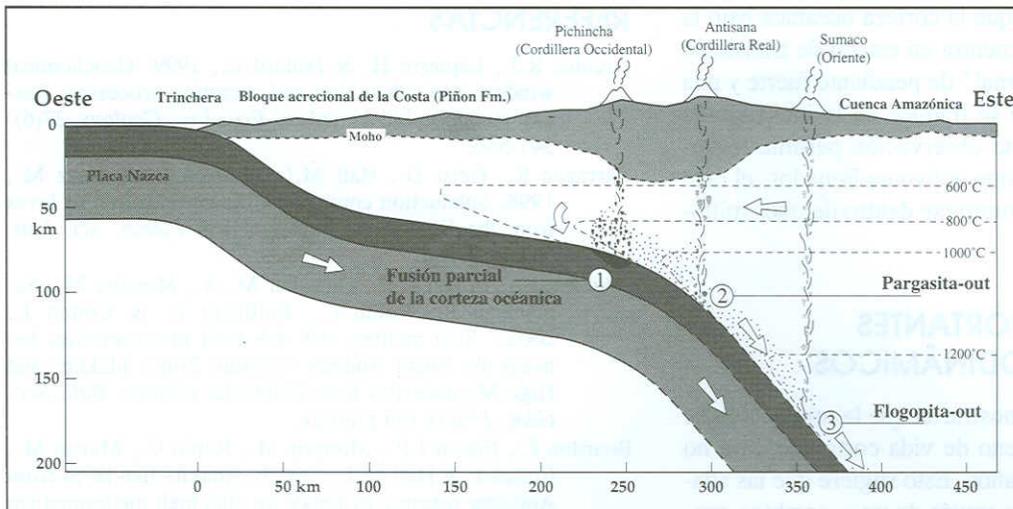


Figura 3. Modelo esquemático de magmatogénesis en tres etapas en la NVZ en Ecuador. Ver las conclusiones para explicaciones. Tomado de Bourdon *et al.* (2002c).

El volcán Antisana: andesitas parecidas a adakitas

En la mitad del arco volcánico, el volcán Antisana presenta la particularidad de producir magmas con características geoquímicas intermedias entre las verdaderas adakitas y las de magmas calco-alcalinos más clásicos (figura 1). Son lavas medio-básicas a ácidas con concentraciones en K_2O más importantes. Presentan igualmente concentraciones bajas en tierras raras pesadas e Itrio, pero no tan bajas como aquellas del Pichincha (Bourdon *et al.*, 2002a; 2002b). El estudio geoquímico de la serie del Antisana pudo mostrar que estas lavas proceden de la fusión parcial a pequeños y variables grados de un manto enriquecido en gránate y anfíbol, parecido a un manto metasomatizado por magmas adakíticos.

Además, el estudio isotópico mostró que las lavas experimentaron un ligero fenómeno de contaminación en la corteza continental antigua de la Cordillera Real en un proceso de Asimilación-Cristalización-Fraccionada (AFC) de pequeña amplitud (Bourdon *et al.*, 2002b).

El volcán Sumaco: la última fase de fusión de un manto metasomatizado por líquidos adakíticos

En el tras-arco, el volcán Sumaco (el más oriental de los volcanes ecuatorianos) produce absarokitas y shoshonitas fuertemente subsaturadas en sílica y enriquecidas en elementos incompatibles. Estas lavas presentan grandes afinidades geoquímicas con los basaltos enriquecidos en Niobio (HNB, High-Nb Basalts) que se encuentran de manera casi sistemática en asociación con las adakitas en numerosos arcos volcánicos del planeta. La principal característica de estas lavas es su concentración anormalmente elevada en Nb, para lavas orogénicas, sugiriendo que son producidas en un manto metasomatizado por magmas adakíticos (los cuales también son enriquecidos en Nb y traen este elemento hacia el manto sub-arco). Además, tienen exactamente las mismas características

isotópicas que las de las lavas del Pichincha, confirmando un origen común y sobre todo ninguna participación de la corteza continental. El estudio geoquímico de las lavas del Sumaco y previos estudios de petrología experimental sobre absarokitas muy parecidas a las del Sumaco (Tatsumi y Koyaguchi, 1989) sugieren que pueden ser producidas por la desestabilización de la flogopita en el manto.

CONSECUENCIAS DE LA SUBDUCCIÓN DE LA CORDILLERA ASÍSMICA DE CARNEGIE

A la escala del planeta, la distribución de las provincias adakíticas por encima de porciones de litósfera subductante horizontal o sub-horizontal sugiere una relación importante entre la fusión parcial de la corteza oceánica y este fenómeno geodinámico particular (Gutscher *et al.*, 2000). Se ha demostrado que la modificación rápida del ángulo de subducción provoca un cambio importante de los parámetros termodinámicos (presión, temperatura) de la placa subducida, permitiendo así la fusión parcial de la corteza oceánica.

En el caso de la margen ecuatoriana, se propone que la entrada reciente en subducción de la cordillera de Carnegie permitió la sub-horizontalización de la corteza oceánica de Nazca, su permanencia en las condiciones térmicas y de presión compatibles con la fusión parcial de la corteza oceánica y finalmente la producción de las adakitas del volcán Pichincha son, por lo tanto, recientes (menos de 1.5 Ma). Esto sugiere también que los magmas adakíticos son el principal medio de metasomatismo del manto sub-arco desde este tiempo. El arrastre del manto modificado (rico en gránate, anfíbol y flogopita) a mayor profundidad por los movimientos de convección podría también explicar las características geoquímicas de los magmas del Antisana y por fin del Sumaco (figura 2).

Este escenario sugiere que la corteza oceánica bajo la margen ecuatoriana se encuentra en estado de transición entre una subducción "normal" de pendiente fuerte y una subducción horizontal que se traduce en la interrupción del volcanismo activo. Esta observación permite levantar la paradoja del volcanismo activo en Ecuador, el cual debería teóricamente interrumpirse dentro de unos millones de años.

LAS ADAKITAS: IMPORTANTES MARCADORES GEODINÁMICOS

Gutscher *et al.* (2000) mostraron que la producción de adakititas es un fenómeno de vida corta que dura no más que unos millones de años. Esto sugiere que las adakititas son solo producidas a través de unos cambios geodinámicos rápidos y transicionales experimentados por las márgenes activas del planeta.

Sobre la base de nuestro trabajo y de otros anteriores, proponemos que las adakititas pueden ser consideradas como poderosos marcadores magmáticos que representan los siguientes cambios geodinámicos:

- la subducción de una dorsal oceánica o de una corteza oceánica muy joven;
- el inicio de una subducción;
- la interrupción de una subducción (incluyendo una colisión);
- la subducción de un cuerpo oceánico asísmico de alta flotabilidad.

CONCLUSIONES

La asociación litológica (en el tiempo y el espacio) de adakititas, andesitas magnesianas, andesitas parecidas a adakititas y basaltos enriquecidos en niobio a través de todo el arco ecuatoriano, refuerzan fuertemente la idea de que el metasomatismo por productos de fusión parcial de la corteza oceánica reemplazó el "clásico" metasomatismo por fluidos hidratados que conduce a la producción de magmas calcoalcalinos "normales". La existencia de un modelo de subducción horizontal permite sugerir que este cambio en el tipo de magmatismo es una respuesta directa a la subducción reciente de la Cordillera de Carnegie debajo de la margen ecuatoriana. La historia y el futuro de otras provincias magmáticas bajo una subducción horizontal permite proponer que la margen ecuatoriana se encuentra probablemente en estado de transición entre una subducción normal de pendiente fuerte (caracterizada por un magmatismo calcoalcalino clásico) y una subducción perfectamente horizontal (caracterizada por una ausencia de magmatismo) (figura 3). Como en otros casos geodinámicos, las adakititas pueden ser consideradas como el marcador magmático de este cambio y su presencia significa probablemente una próxima desaparición (dentro de unos millones de años) del volcanismo activo en Ecuador.

REFERENCIAS

- Arculus R.J., Lapierre H. & Jaillard E., 1999. Geochemical window into subduction and accretion processes: Rapas metamorphic complex, Ecuador. *Geology* 27(6): 547-550.
- Barragan R., Geist D., Hall M.L., Larson P. & Kurz M., 1998. Subduction controls on the composition of lavas from the Ecuadorian Andes. *Earth Planet. Sci. Lett.* 154: 153-166.
- Bourdon E., Eissen J. P., Gutscher M.-A., Monzier M., Samaniego P., Robin C., Bollinger C. & Cotten J., 2002a. Slab melting and slab melt metasomatism beneath the North Andean Volcanic Zone: adakitites and High-Mg andesites from Pichincha volcano. *Bull. Soc. Géol. France* (en prensa).
- Bourdon E., Eissen J.P., Monzier M., Robin C., Martin M., Cotten J. & Hall M.L., 2002b. Adakite-like lavas from Antisana volcano: evidence for slab melt metasomatism beneath the Andean Northern Volcanic Zone. *J. Petrol.*, 43/2: 199-217.
- Bourdon E., Eissen J.-P., Gutscher M.-A., Monzier M., Hall M.L. & Cotten J., 2002c. Magmatic response to early aseismic ridge subduction: the Ecuadorian margin case (South America). *Earth Planet. Sci. Lett.*, (en prensa).
- Carroll M.R. & Wyllie P.J., 1989. Experimental phase relations in the system tonalite-peridotite-H₂O at 15 kb: implications for assimilation and differentiation processes near the crust-mantle boundary. *J. Petrol.*, 30: 1351-1382.
- Defant M.J. & Drummond M.S., 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347: 662-665.
- Gutscher M. A., Maury R.C., Eissen J. P. & Bourdon E., 2000. Can slab melting be caused by flat subduction? *Geology*, 28(6): 535-538.
- Hörmann P.K. & Pichler H., 1982. Geochemistry, petrology and origin of the Cenozoic volcanic rocks of the northern Andes in Ecuador. *J. Volcan. Geotherm. Res.*, 12: 259-282.
- Kay R.W., 1978. Aleutian magnesian andesites: melts from subducted Pacific ocean crust, *J. Volcan. Geotherm. Res.*, 4: 117-132.
- Kepezhinskas P.K., Defant M.J. & Drummond M.S., 1996. Progressive enrichment of island arc mantle by melt-peridotite interaction inferred from Kamchatka xenoliths. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60(7): 1217-1229.
- Kilian R., Hegner E., Fortier S. & Satir M., 1995. Magma evolution within the accretionary mafic basement of quaternary Chimborazo and associated volcanoes (Western Ecuador). *Rev. Geol. Chile*, 22(2): 203-218.
- Prouteau G., Scaillet B., Pichavant M. & Maury R.C., 2001. Evidence for mantle metasomatism by hydrous silicic melts derived from subducted oceanic crust. *Nature*, 410: 197-200.
- Sajona F.G., Bellon H., Maury R.C., Pubellier M., Cotten J. & Rangin C., 1994. Magmatic response to abrupt changes in geodynamic settings: Pliocene-Quaternary calc-alkaline and Nb-enriched lavas from Mindanao (Philippines). *Tectonophysics*, 237: 47-72.
- Tatsumi Y. & Koyaguchi T., 1989. An absarokite from a phlogopite lherzolite source. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 102(1): 33-40.