

PROCESOS MAGMÁTICOS Y CONDICIONES FÍSICAS PRE-ERUPTIVAS ASOCIADOS CON LAS ERUPCIONES RECIENTES DEL VOLCÁN UBINAS (PERÚ)

Pablo SAMANIEGO^{1,2,3}, Marco RIVERA³, Céline LIORZOU⁴

¹ Laboratoire Magmas et Volcans, Université Blaise Pascal, CNRS, IRD, 5, rue Kessler, F-63038 Clermont-Ferrand, Francia

² IRD, Teruel 357, Miraflores, Lima 18, Perú (pablo.samaniego@ird.fr)

³ INGEMMET, Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico, Av. Dolores (Urb. Las Begonias B-3), J.L. Bustamante y Rivero, Arequipa, Perú

⁴ Laboratoire Domaines Oceaniques, UBO, Brest, France

INTRODUCCIÓN

La evaluación de la amenaza volcánica se basa en gran medida en la reconstrucción de la historia eruptiva de los volcanes activos o susceptibles de reactivarse, con el fin de identificar los diferentes tipos de dinamismos eruptivos, así como la frecuencia y la magnitud de sus erupciones típicas de cada volcán. En el caso del volcán Ubinas (Perú), los estudios vulcanológicos llevados a cabo en los últimos años (Thouret et al., 2005; Rivera, 2010) han permitido establecer varios escenarios eruptivos futuros que comprenden erupciones pequeñas de tipo vulcaniano ($VEI \leq 2$, Índice de Explosividad Volcánica); erupciones vulcanianas a subplinianas de tamaño moderado ($VEI 3$); y grandes erupciones plinianas altamente explosivas ($VEI \geq 4$). Sin embargo, durante una crisis volcánica, uno de los mayores retos de la vulcanología es identificar cual de los escenarios eruptivos previamente definidos es el más probable de reproducirse. Con esta idea en mente, en este trabajo vamos a describir las características petrológicas de los productos eruptivos emitidos durante los últimos miles de años por el volcán Ubinas, con el fin de constreñir las condiciones físicas (P-T) pre-eruptivas de los magmas y de esta manera poder reconstruir los procesos magmáticos pre-eruptivos con el fin de inferir patrones de comportamiento futuro del volcán.

CRONOLOGÍA ERUPTIVA

El volcán Ubinas (16° 22' S, 70° 54' O) está localizado a ~65 km al este de la ciudad de Arequipa (Fig. 1). Este volcán es el más activo del sur peruano, habiéndose reportado al menos 24 eventos eruptivos ($VEI 1-3$) durante la denominada época histórica (es decir posterior al año de 1532 AD hasta la actualidad, Siebert et al., 2010). La historia eruptiva del volcán Ubinas (Thouret et al., 2005; Rivera, 2010) comprende la formación de dos edificios sucesivos que edificaron un estratovolcán truncado por una gran caldera. Los estudios vulcanológicos previamente citados señalan que la etapa eruptiva más reciente de este volcán fue posterior al último máximo glacial (LGM), cuya edad ha sido estimada en los Andes en el rango comprendido entre 30-21 ka, con un eventual avance menor (late glacial) alrededor de 18-15 ka (Smith et al., 2008; Seltzer, 1990). Los depósitos de esta etapa eruptiva son importantes secuencias de caída de piroclastos que afloran en el sector sur y suroccidental del volcán. Así por ejemplo, en la sección stratigráfica de Sacuhaya (9 km al SSE de la cumbre, Fig. 2a) se encuentran alrededor de 10 niveles de lapilli de pómez y líticos asociados a importantes erupciones plinianas. Los estudios tefrocronológicos regionales permitieron estimar que la erupción pliniana basal de esta secuencia tiene una edad comprendida entre 10 y 14 ka (Juvigné et al., 1997), mientras que una capa de la parte media-inferior de la secuencia fue datada en 7-8 ka. La última erupción pliniana importante del Ubinas ha sido datada en 980 años AP (i.e. 1 ka, Thouret et al., 2005).

Durante el período histórico, la actividad del Ubinas ha estado caracterizada por la ocurrencia de frecuentes erupciones de talla pequeña a moderada ($VEI 1-2$), que incluían explosiones de tipo vulcaniano y frecuentes emisiones de gases y ceniza. Este tipo de erupciones corresponde a la actividad observada para el Ubinas durante el reciente episodio eruptivo (2006-2009 AD; Rivera et al.,

2010). Sin embargo, el evento más importante del período histórico fue una erupción de talla moderada (VEI 3) catalogada como de tipo vulcaniana acaecida en 1667 AD y que se caracterizó por generar flujos piroclásticos de escoria que fueron depositados en los flancos superiores del edificio.

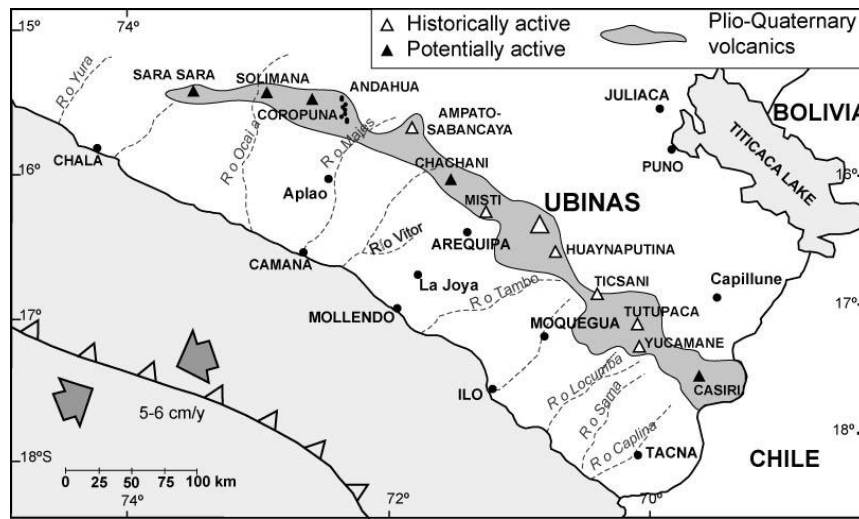


Figure 1. Arco volcánico Cuaternario del Sur del Perú. Se muestran los volcanes con actividad histórica (i.e. posterior a 1532 AD) y los volcanes potencialmente activos.

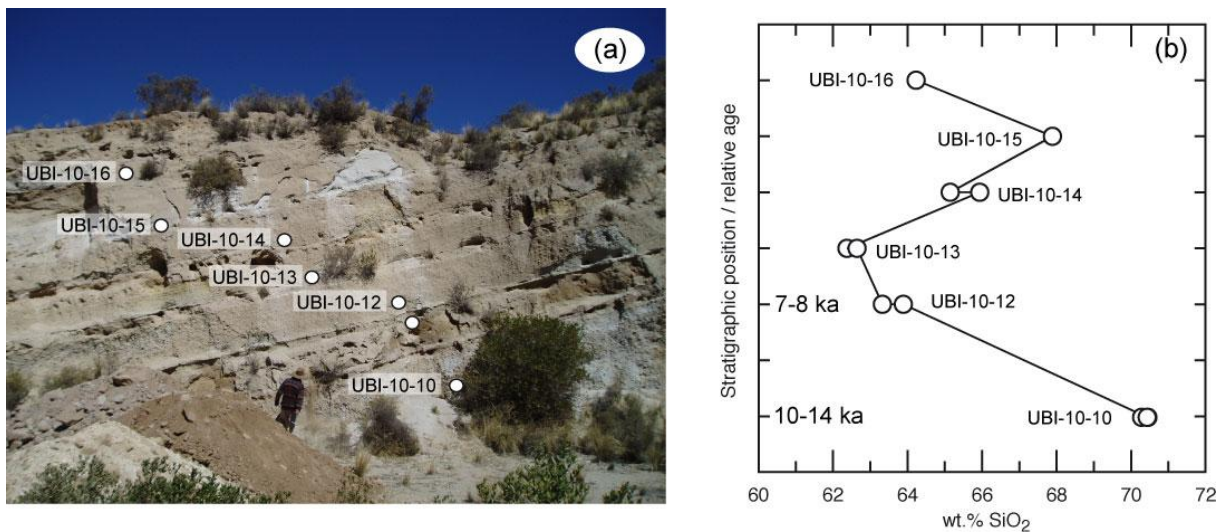


Figure 2. (a) Sección estratigráfica de Sacuhaya (9 km al SSE del volcán) mostrando la actividad post-glaciar del Ubinas. (b) Variación del contenido de sílice.

CARACTERIZACIÓN PETROLÓGICA

Un total de 53 análisis químicos de elementos mayores y trazas fueron utilizados en este estudio, 30 de los cuales provienen de Thouret et al. (2005), habiéndose realizado 23 nuevos análisis químicos. Los productos eruptivos de las erupciones post-glaciares del volcán Ubinas definen una serie magmática calco-alkalina de alto K, que va desde las andesitas básicas hasta las riolitas (55-71 wt.% SiO₂; 2-4 wt.% K₂O, Fig. 3a). El estudio detallado de la secuencia volcánica muestra una disminución progresiva del contenido de sílice (Fig. 3b). La secuencia se inicia con un nivel de tefra riolítica (69-71 wt.% SiO₂) cuya edad se estima en 10-14 ka, luego se tienen al menos 6 niveles de tefra dacítica (62-66 wt.% SiO₂), cuya edad debe estar comprendida entre 10 y 1 ka, a continuación se tiene el nivel de caída de la erupción de 980 años AP de composición andesítica (59-62 wt.% SiO₂), y más recientemente, los productos volcánicos de composición andesítica básica (55-57 wt.% SiO₂) de las erupciones históricas (1667 AD y 2006-2009 AD). Cabe señalar que esta disminución en el

contenido de sílice va acompañada de variaciones consistentes en la mayoría de elementos mayores y trazas.

De manera concomitante a la variación geoquímica, se ha podido observar además una variación en la composición mineralógica de los productos eruptivos. Es así que las riolitas basales y las dacitas muestran una asociación mineralógica compuesta por pl + bio + amph + mag; mientras que las andesitas presentan una mineralogía compuesta por pl + amph + opx + cpx + mag ± bio; y finalmente las andesitas básicas se caracterizan por una asociación mineral compuesta por pl + opx + cpx + mag ± amph ± ol.

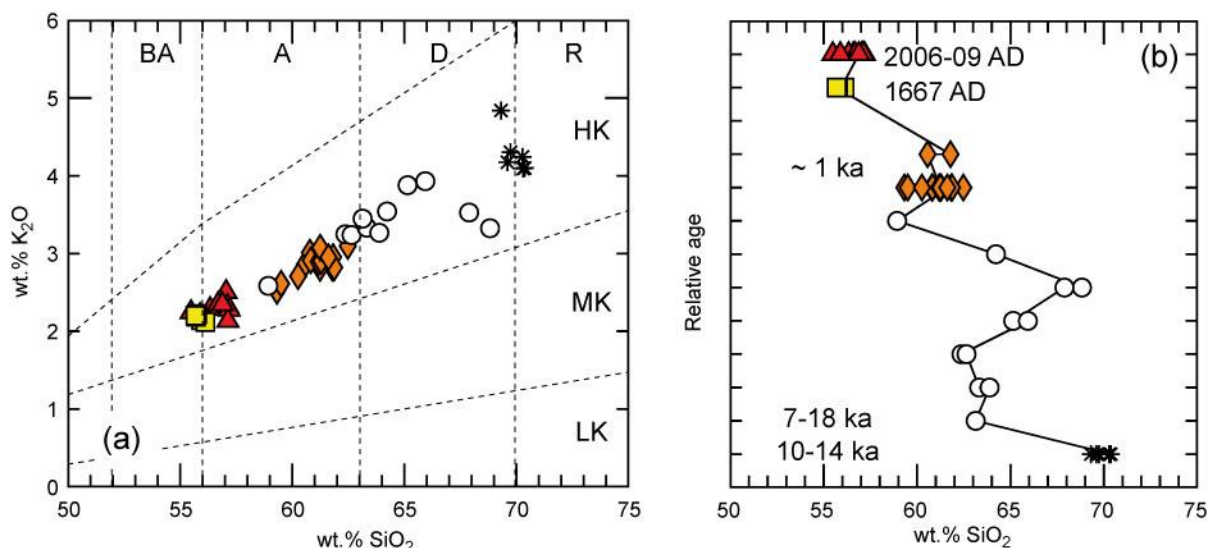


Figura 3. (a) Diagrama K₂O vs. SiO₂ para las magmas post-glaciares del volcán Ubinas (modificado de Peccerillo y Taylor, 1976). BA – andesitas básicas, A – andesitas, D – dacitas, R – riolitas; LK – serie pobre en K₂O, MK – sería moderadamente rica en K₂O y HK – serie rica en K₂O. (b) Contenido de sílice de los magmas en función de su posición estratigráfica.

CONDICIONES DE P-T PRE-ERUPTIVAS

Las condiciones de P-T pre-eruptivas de los magmas de las erupciones recientes del Ubinas fueron constreñidas gracias a la aplicación de diferentes geotermobarómetros existentes en la literatura. Para la aplicación de estos geotermobarómetros se tuvo especial cuidado en realizar los test correspondientes que aseguren el equilibrio entre las fases minerales utilizadas. Adicionalmente se escogieron únicamente las composiciones de los bordes de los cristales de manera a evaluar las condiciones de P-T justo antes de la erupción. El recientemente re-calibrado geotermobarómetro de “Al-in-hornblende” (Ridolfi et al., 2010) es particularmente útil para magmas calco-alcalinos y brinda presiones en el rango de 261 ± 41 MPa para los magmas andesíticos/dacíticos del Ubinas y valores de 222 ± 66 MPa para los magmas riolíticos, mientras que para las andesitas básicas, este geobarómetro asigna valores mucho más altos, en el rango de 437 ± 16 MPa. Por su parte, la determinación de la temperatura fue realizada por varios métodos independientes, entre ellos el equilibrio plagioclasa-anfíbol (pl-hbl, Holland y Blundy, 1994) y los geotermómetros de plagioclasa-melt (pl-melt) y clinopiroxeno-melt (cpx-melt, Putirka, 2008). Las riolitas presentan temperaturas más bajas, en el rango de 840 ± 32 °C (pl-hbl) y 813 ± 6 °C (pl-melt). Por su parte, las andesitas básicas muestran temperaturas mucho más altas, en el rango de 935 ± 27 (pl-melt), mientras que las andesitas presentan, como es de esperar, temperaturas intermedias en el rango de 850-950°C.

PROCESOS PETROGÉNICOS

Los estudios petrogenéticos realizados en este volcán apuntan a un modelo petrogenético basado en un proceso de cristalización fraccionada acompañado de asimilación de material

proveniente de la corteza superior (AFC por sus siglas en inglés, Thoutret et al., 2005). En efecto, un modelo geoquímico basado en elementos mayores, trazas e isótopos explica satisfactoriamente la evolución entre las andesitas básicas y las riolitas por un proceso de cristalización fraccionada de un cumulado compuesto de pl + cpx + amph + mag, con una tasa de cristalización de 50-60% (Rivera, 2010). El rol del anfíbol en la génesis de los magmas silíceos se aprecia claramente en el diagrama Dy/Yb vs. SiO₂ (Fig. 4b). Sin embargo, este modelo no explica las composiciones intermedias. En efecto, un modelo R-MELTS (Gualda et al., 2012) fue elaborado con el fin de definir la evolución de las composiciones del líquido residual durante un proceso de cristalización fraccionada en la corteza superior. Los resultados de este modelo fueron graficados en el diagrama MgO vs. SiO₂ (Fig. 4a) en el cual se muestra que las riolitas pueden efectivamente ser el producto de la cristalización fraccionada a partir de magmas primitivos de composición andesítica básica. Sin embargo, este diagrama muestra que los magmas de composición andesítica y dacítica no siguen la tendencia del modelo de cristalización, alineándose más bien por un proceso de mezcla de magmas. En efecto, mientras los fenocristales en las riolitas (pl + amph + bio + mt) se presentan en equilibrio con el líquido magmático, en las muestras de composición más básica, y en especial en las andesitas básicas de las erupciones recientes se observa una mineralogía mucho más compleja (pl + cpx + opx + amph ± bio ± ol + mag), con frecuentes texturas de disequilibrio como bordes o coronas de reacción, zonas de reabsorción, y sobrecrecimientos de composición más máfica, especialmente en la plagioclasa y en el clinopiroxeno.

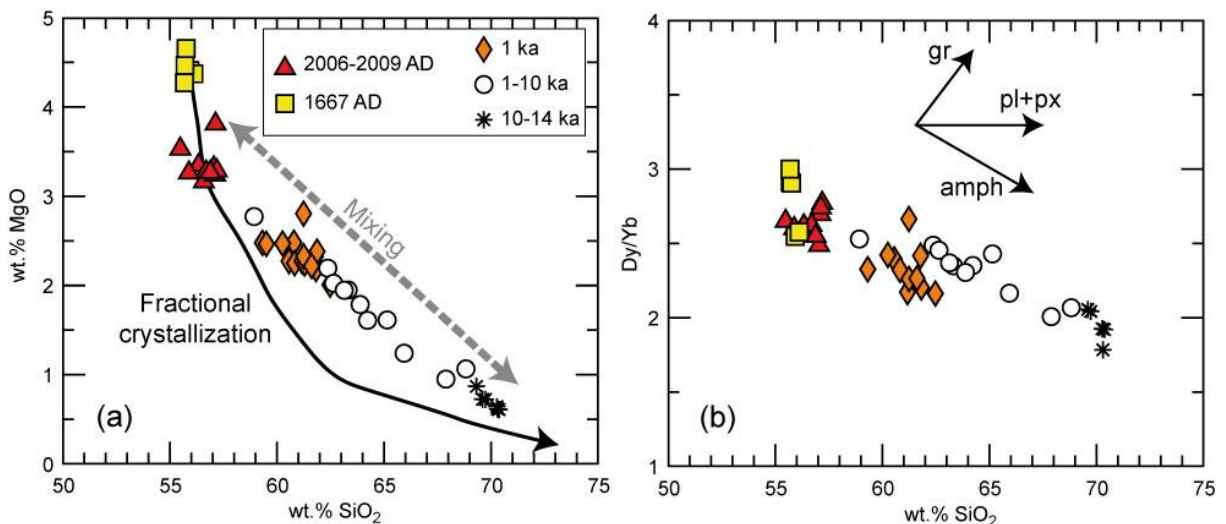


Figura 4. (a) Diagrama MgO vs. SiO₂ mostrando un modelo de cristalización fraccionada (R-MELTS) así como una hipotética curva de mezcla entre un polo básico y un polo silíceo. **(b)** Diagrama Dy/Yb vs. SiO₂ mostrando la tendencia asociada con la cristalización de anfíbol.

CONCLUSIÓN

La cronología eruptiva de las erupciones post-glaciares del volcán Ubinas muestra un claro patrón de disminución del contenido de sílice, desde composiciones riolíticas con una asociación mineral compuesta de pl + bio + amph + mag, hasta los productos eruptivos de composición andesítica básica de las erupciones históricas caracterizadas por una asociación mineral compuesta por pl + opx + cpx + mag ± amph ± ol. Cabe señalar que tanto la composición química como la asociación mineral varían de forma progresiva entre las erupciones más antiguas y las más recientes.

El estudio termobarométrico permitió determinar que los magmas andesíticos y riolíticos cristalizaron en un reservorio magmático superficial (200-250 MPa, 850-950°C). Por el contrario, los magmas de composición más básica parecen haber cristalizado a presiones y temperaturas mayores (420-450 MPa, 950-1000°C). Esto muestra la existencia de dos reservorios magmáticos diferentes.

La modelización geoquímica muestra que el polo silíceo (riolítico) es el resultado de un proceso de cristalización fraccionada acompañado por asimilación de material de la corteza superior. Sin embargo, los términos intermedios (andesíticos y dacíticos) resultarían de un proceso de mezcla entre el polo silíceo y un polo básico que estaría representado por los magmas primitivos profundos.

Estos datos muestran una evolución compleja caracterizada por un reservorio profundo en el cual evolucionan los magmas básicos, y un reservorio superficial en donde se acumulan y evolucionan los magmas de composición andesítica a riolítica. La evolución geoquímica y mineralógica observada en el Ubinas reflejaría así la progresiva disminución del aporte de magmas silíceos, originados en un reservorio superficial, con respecto a los magmas profundos originados en un reservorio profundo. Dado que las erupciones históricas del Ubinas (1667 y 2006-2009 AD) se caracterizaron por la emisión de magmas primitivos provenientes de un reservorio profundo, se puede inferir que en la actualidad no existirían las condiciones necesarias en el reservorio magmático superficial para que se produzca una gran erupción pliniana con intervención de magmas andesíticos a riolíticos.

REFERENCIAS

- Gualda G.A.R., Ghiorsio M.S., Lemons R.V., Carley T.L. (2012). Rhyolite-MELTS: A modified calibration of MELTS optimized for silica-rich, fluid-bearing magmatic systems. *Journal of Petrology* 53, 875-890.
- Holland T., Blundy J. (1994). Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. *Contrib. Mineral. Petrol.* 116, 433-447.
- Juvigné E., Thouret J.C., Gilot E., Gourgaud A., Legros F., Uribe M., Graf K. (1997). Etude tephrostratigraphique et bioclimatique du Tardiglaciaire et de l'Holocène de la Laguna Salinas, Pérou méridional. *Géographie physique et Quaternaire* 51, 2, 219-231.
- Putirka, K.D. (2008). Thermometers and barometers for volcanic systems. *Rev. Mineral. Geochem* 69, 61-120.
- Ridolfi, F., Renzulli, A., Puerini, M. (2010). Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: an overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes. *Contrib. Mineral. Petrol.* doi 10.1007/s00410-009-0465-7.
- Rivera M., Thouret J.-C., Mariño J., Berolatti R., Fuentes J. (2010). Characteristics and management of the 2006-2008 volcanic crisis at the Ubinas volcano (Peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 198, 19-34.
- Rivera M. (2010). Genèse et évolution des magmas andésitiques et rhyodacitiques récents des volcans Misti et Ubinas (Sud du Pérou). Thèse PhD. Ecole Doctoral de Sciences Fondamentales. Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand II, France, 407 p.
- Seltzer G.O. (1990). Recent glacial history and paleoclimate of the Peruvian-Bolivian Andes: *Quaternary Science Review* 9, 137-152.
- Siebert, L., Simkin, T., Kimberly P. (2010). *Volcanoes of the world*. Third édition. Smithsonian Institution and University of California press. 551 pp.
- Smith J.A., Mark B.G., Rodbell D.T. (2008). The timing and magnitude of mountain glaciation in the tropical Andes. *Journal of Quaternary Science* 23, 609-634.
- Thouret, J.C., Rivera, M., Wörner, G., Gerbe, M.C., Finizola, A., Fornari, M., Gonzales, K. (2005). Ubinas: the evolution of the historically most active volcano in southern Peru. *Bulletin of Volcanology* 67, 557-589.