



## Relación entre la geoquímica y las anomalías de Bouguer para el volcanismo cenozoico (Grupo Calipuy) y el batolito de la Cordillera Blanca

**Elizabeth Ordóñez, Lisenia Chávez, Pedro Navarro, Diana Pajuelo, y Mirian Mamani**

INGEMMET, Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Av. Canadá 1470, San Borja, Lima, Perú ([eordonez@ingemmet.gob.pe](mailto:eordonez@ingemmet.gob.pe))

### 1. Introducción

Los estudios geológicos realizados en la zona Norte del Perú, a lo largo de la Cordillera Occidental de los Andes, donde se han reconocido extensas secuencias volcánicas emplazadas entre los 53 y 14 Ma (Eoceno-Mioceno) fueron denominadas como "Grupo Calipuy" (Cossío, 1964; Wilson, 1975; Farrar & Noble, 1976). Teniendo como referencia los trabajos desarrollados por el Proyecto GR-4 "Geología de las rocas volcánicas de la Cordillera Occidental del Norte del Perú", desarrollado por la Dirección de Geología Regional en el INGEMMET, se ha considerado la división del "Grupo Calipuy" por segmentos volcánicos de acuerdo a su ubicación geográfica, con la finalidad de realizar una adecuada y sistemática investigación geológica. En el área de estudio están incluidos los segmentos de norte a sur, como Cajamarca, Santiago de Chuco, y Cordillera Negra, ubicados en parte de los departamentos de Cajamarca, La Libertad y Ancash. Basándonos en la nueva cartografía geológica de los volcánicos del "Grupo Calipuy" donde se han identificado las estructuras volcánicas: centros volcánicos, calderas y domos (Rivera et al., 2005; Navarro et al., 2010); también considerando a las rocas intrusivas del Batolito de la Cordillera Blanca, que se desarrollaron durante la actividad magmática de los arcos Calipuy (24-10 Ma) y Negritos (10-3 Ma) en el Mioceno (Chávez et al., 2010) y estuvieron controlados en su mayoría por fallas regionales con rumbos de NO-SE (Fig. 1). En estudios geoquímicos de los depósitos volcánicos del "Grupo Calipuy" y las rocas intrusivas de la Cordillera Blanca agrupados en los arcos Calipuy y Negritos se muestran variaciones en el incremento de los cocientes de Sr/Y, Sm/Yb y La/Sm (Navarro et al., 2009; Chávez et al., 2010).

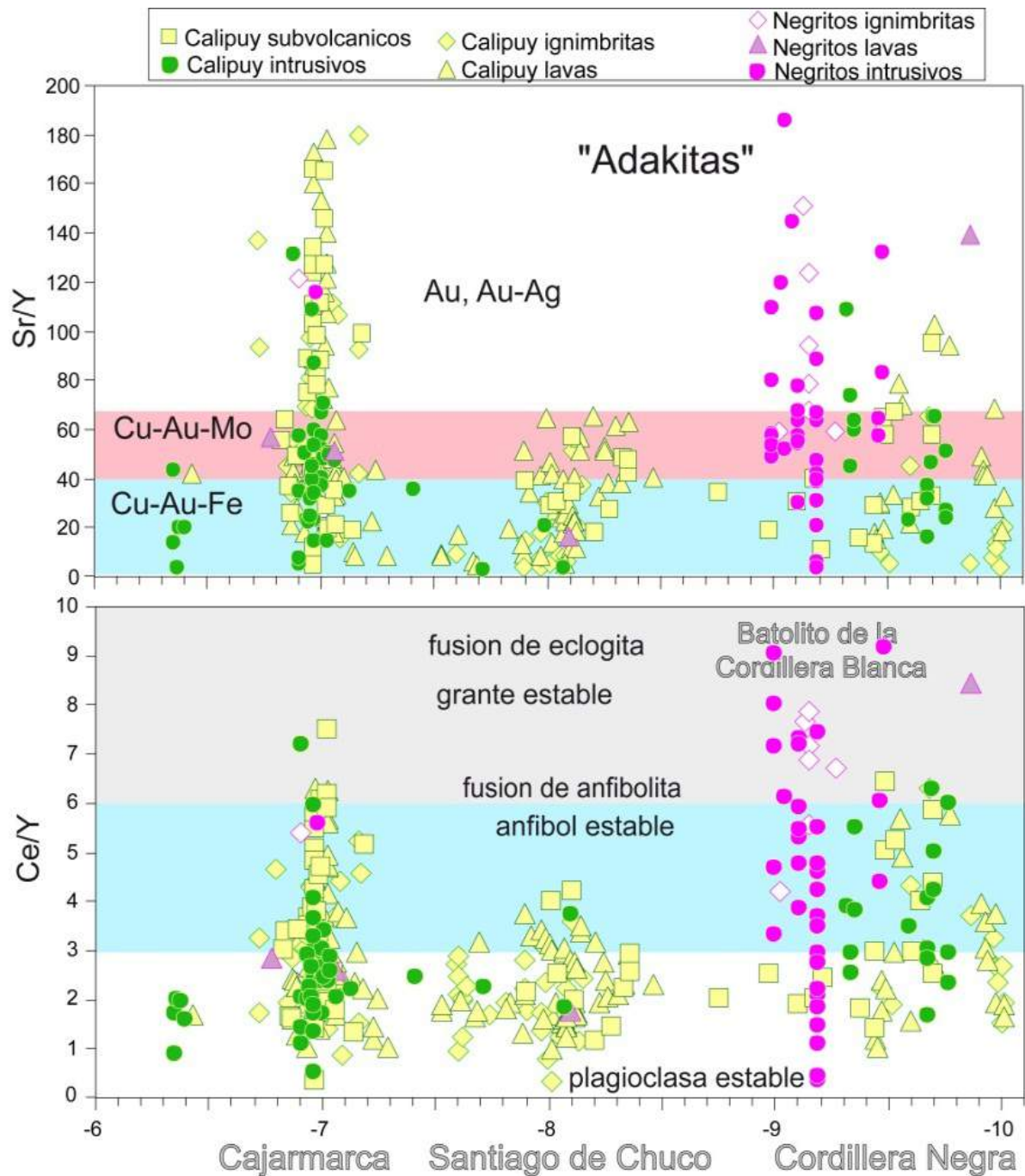
Estas variaciones han sido atribuidas al engrosamiento de la corteza continental desde el Mioceno. Actualmente existen pocos estudios relacionados al espesor de la corteza en el Norte del Perú. El primer trabajo (Fukao et al., 1999), en base a mediciones gravimétricas, presentó un mapa de anomalías de Bouguer que permitía estimar la variación del espesor de la corteza. Los valores más bajos de gravimetría (-439.914 mgal) corresponden al mayor espesor de la corteza (~70 km), y los valores mayores (+120.016 mGal) indicarían una corteza delgada (~22 km) (Fig. 4).

Basándose en las anomalías gravimétricas de Bouguer, el presente trabajo confirma la relación entre las rocas volcánicas que presentan firmas de tipo adakita ( $Sr/Y > 70$ ) y el engrosamiento cortical que se desarrolló en el Mioceno. Hay que tener en cuenta que en este periodo de tiempo se formaron los principales yacimientos epitermales de alta y baja sulfuración asociados a estos depósitos volcánicos (Noble & McKee, 1999; Kihien, 1997).

### 2. Marco geológico

El substrato en el cual se emplazaron los volcánicos del Grupo Calipuy está constituido por intercalaciones de rocas sedimentarias y volcano-sedimentarias acumuladas durante el Jurásico superior, Cretáceo, y Paleógeno. Estas secuencias presentan pliegues abiertos y volcados, así como fallas inversas y normales. La estratigrafía basada en el cartografiado geológico y volcanológico (Navarro et al., 2010) permite establecer una adecuada correlación estratigráfica. Del Eoceno superior al Mioceno inferior ocurrieron numerosos episodios efusivos, explosivos y





**Figura 2.** (A) Diagrama de las variaciones de los cocientes de Sr/Y. (B) Diagrama de las variaciones de Ce/Y. Relacionadas con la latitud, a lo largo del Norte del Perú. Para las rocas ígneas de los segmentos Cajamarca, Santiago de Chuco, Cordillera Negra.

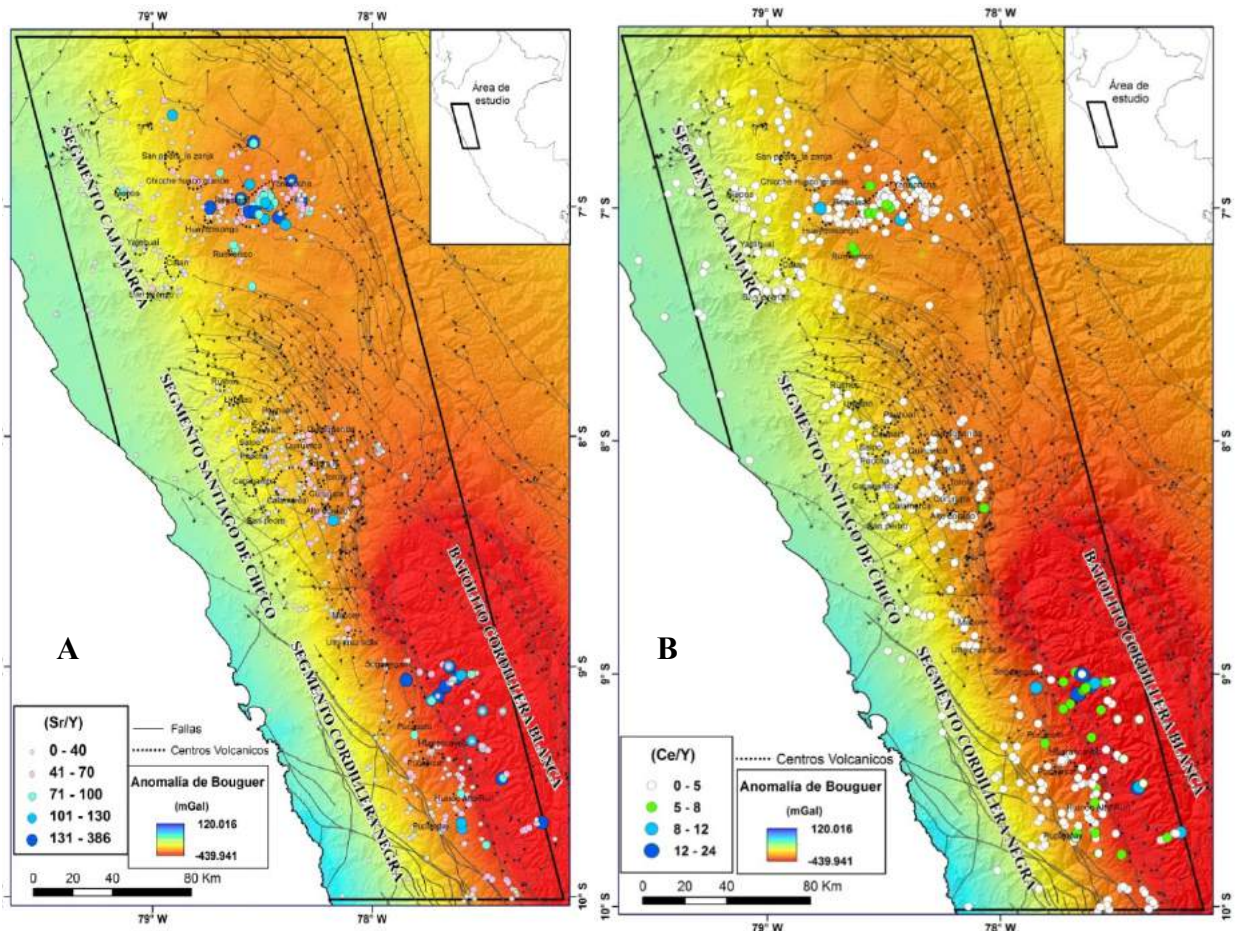
### 3. Relación entre la geoquímica y las anomalías de Bouguer

Las rocas ígneas correspondientes al arco Calipuy (24–10 Ma) están conformadas por lavas de composición de andesitas basálticas a andesitas, y por depósitos piroclásticos de composición dacítica y riolítica. Durante el emplazamiento del arco Negritos (10–3 Ma) predominaron los depósitos piroclásticos de composición dacítica a riolítica que fueron emitidos por los últimos eventos del complejo volcánico Yanacocha (Cajamarca) y, hacia el sur, los depósitos piroclásticos de la Formación Yungay. Las rocas intrusivas del Batolito de la Cordillera Blanca generalmente son leucogranitos, granitos, granodioritas y tonalitas.

Analizando la geoquímica de las rocas ígneas (lavas, depósitos piroclásticos, subvolcánicos, e intrusivos) para el caso de los arcos magmáticos Calipuy y Negritos, se observa que en los segmentos de Cajamarca y Cordillera Negra existe un notorio incremento en los cocientes Sr/Y, mostrando que estas rocas ígneas tienen una signatura del tipo adakita (Defant & Drummond, 1990); mientras que para el segmento Santiago de Chuco los cocientes Sr/Y son  $<70$  (Fig. 2A). Estos resultados evidencian que las rocas ígneas de los segmentos Cajamarca, Santiago de Chuco y Cordillera Negra tuvieron una evolución magmática diferente.

Estas variaciones geoquímicas marcadas de los arcos Calipuy y Negritos quizás se debieron a un incremento del espesor cortical en el Mioceno. En este periodo los magmas demoraron en su ascenso y fueron forzados a formar cámaras magmáticas intermedias entre la corteza inferior y superior. El cambio de transición a rocas con

signatura de adakita se produjo en un tiempo donde existió la mayor producción de depósitos pirocústicos en respuesta a la maduración termal de la corteza debido al engrosamiento cortical y al incremento en la velocidad de convergencia de la subducción (Chávez et al., 2010).



**Figura 3.** (A) Mapa de anomalías de Bouguer mostrando las variaciones geoquímicas en las razones Sr/Y. (B) Mapa de anomalías de Bouguer mostrando las variaciones geoquímicas en las razones Ce/Y. Estos mapas son válidos para las rocas volcánicas de los segmentos Cajamarca, Santiago de Chuco, Cordillera Negra, y para las rocas intrusivas de la Cordillera Blanca.

El modelo de Mantle & Collins (2008) usa los cocientes Ce/Y para estimar espesores de corteza y/o las profundidades de la columna cortical donde los magmas se emplazan (Fig. 2B). Las muestras del batolito de la Cordillera Blanca (15–8 Ma) presentan los valores más altos de Ce/Y, de 0.1 a 9. Siguen las rocas volcánicas de los segmentos Cajamarca y Cordillera Negra con valores de Ce/Y de 0.1 a 7. En el segmento Santiago de Chuco, los valores de Ce/Y van de 0.1 a 4, siendo muy notario para este último segmento los valores de Ce/Y muy bajos en comparación con los segmentos Cajamarca, Cordillera Negra y batolito de la Cordillera Blanca.

Por lo tanto, las rocas ígneas que sufrieron mayor presión y temperatura probablemente se desarrollaron en cámaras magmáticas profundas e intermedias y sugieren la fraccionación de minerales residuales como el granate y anfíbol. Este conjunto de rocas corresponde al batolito de la Cordillera Blanca y los segmentos Cajamarca y Cordillera Negra. En tanto las rocas volcánicas del segmento Santiago de Chuco se desarrollaron en cámaras

magmáticas someras y sugieren una fraccionación de anfíbol y clinopiroxeno.

Para relacionar los cocientes Sr/Y y Ce/Y (Fig. 2A, 2B) con las anomalías de Bouguer (Fig. 3A, 3B) hay que tener en cuenta que los cocientes Sr/Y sirven para estimar espesores corticales y reconocer a rocas de tipo adakita. En cambio los cocientes Ce/Y sirven como parámetros para indicar los espesores corticales. Por lo tanto, no es muy recomendable usar cocientes Sr/Y (Fig. 3A) para este tipo de comparación ya que Sr es un elemento incompatible (LILE) y móvil que se involucra en fases fluidas, lo que hace que sus concentraciones pueden estar controladas por otros factores geoquímicos. Mientras que el elemento incompatible Ce (HFSE) es menos móvil y difícilmente se involucra en otras fases químicas. Entonces los cocientes Ce/Y proporcionan un mejor indicador de cambios en la columna cortical y/o espesor cortical.

Comparando los valores de Ce/Y de las rocas ígneas con los datos de gravimetría de las anomalías de Bouguer (Fig.

3B) encontramos que para el batolito de la Cordillera Blanca los cocientes de Ce/Y son muy altos y los valores negativos de anomalías de Bouguer van de -420 a -320 mgal. En el segmento Cordillera Negra, los valores varían de -330 a -230 mgal. En el segmento Cajamarca, los valores de las anomalías de Bouguer van de -283 a -240 mgal. Para estos dos segmentos las razones Ce/Y son casi similares. Finalmente el segmento Santiago de Chuco tiene los cocientes Ce/Y más bajos, con valores de anomalías de Bouguer que varían de -120 a -280 mgal.

En base a esta comparación se confirma que la columna cortical más espesa se ubica en la zona del batolito de la Cordillera Blanca. Además este dominio cortical está controlado por el sistema de fallas de la Cordillera Blanca (Romero & Quispe, 2008). En tanto los magmas de los segmentos Cajamarca y Cordillera Negra se formaron dentro de una corteza intermedia con espesores similares. Los del segmento de Santiago de Chuco se formaron en una corteza relativamente delgada.

#### 4. Conclusiones

La distribución espacial de las estructuras volcánicas (calderas, estratovolcanes, y domos) del Grupo Calipuy y los cuerpos plutónicos del batolito de la Cordillera Blanca estuvieron controlados por la combinación de sistemas de fallas regionales con rumbo NO-SE (Fig. 1).

Hemos demostrado que los cocientes Ce/Y son los más confiables para indicar cambios en el espesor cortical (Fig. 3B), mostrando que las áreas con mayor producción de magmas félsicos (riodacitas, dacita, riolitas, leucogranitos, granitos) coinciden con valores bajos de la anomalía de Bouguer. En caso contrario, para magmas máficos los valores de anomalía de Bouguer son altos.

Teniendo en cuenta esos resultados, las rocas ígneas de los segmentos Cajamarca y Cordillera Negra coinciden en un engrosamiento cortical moderado a alto. Para el segmento Santiago de Chuco las rocas intermedias a máficas se emplazaron en una corteza ligeramente delgada y esta variación coincide espacialmente con la parte sur de la deflexión de Cajamarca.

Las rocas intrusivas del batolito de la Cordillera Blanca compuestas mayormente por rocas félsicas con valores altos de Ce/Y y los valores de anomalías de Bouguer relativamente bajos nos sugieren que existió un mayor engrosamiento de la corteza continental en esta zona de Ancash (Fig. 3B). Según estas características geoquímicas y geofísicas podemos vincular a las ocurrencias metálicas de Au y Au-Ag al engrosamiento cortical que se desarrolló en los arcos Calipuy y Negritos (Fig. 2A).

#### Referencias

- Chávez, L., Mamani, M., Navarro, P., Martiarena, R., Rodríguez, F. 2010. Variaciones geoquímicas y clasificación por arcos magmáticos de las rocas volcánicas del "Grupo Calipuy": Cajamarca, La Libertad y Ancash. XV Congreso Peruano de Geología, Resúmenes, p. 916-920.
- Cossío, A. 1964. Geología de los cuadrángulos de Santiago de Chuco y Santa Rosa. Comisión de la Carta Geológica Nacional, Boletín 8, 69 p.
- Defant, M., Drummond, M. 1990. A model for trondhjemite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons. *J. Geophys. Res.*, v. 95, p. 21503-21521.
- Farrar, E., Noble, D. 1976. Timing of late Tertiary deformation in the Andes of Peru. *Geology Society of America Bulletin*, v. 87, p. 1247-1250.
- Fukao, Y., Kono, M., Yamamoto, A., Satio, M., Nawa, K., Giesecke, A., Perales, C. 1999. Gravity measurements and data reduction for Bouguer anomaly map of Peru. *Bulletin of Earthquake Research Institute University of Tokio*, v. 74, p. 161-266.
- Kihien, A. 1997. La Franja de oro-cobre del norte del Perú. Resúmenes extendidos, IX Congreso Peruano de Geología, Lima, p. 51-56.
- Mantle, G., Collins, W. 2008. Quantifying crustal thickness variations in evolving orogens: Correlation between arc basalt composition and Moho depth. *Geology*, v. 36, p. 87-90.
- Navarro, P., Rivera, M., Monge, R. 2009. Nuevos aportes sobre el volcanismo cenozoico del Grupo Calipuy en La Libertad y Ancash: Geocronología y geoquímica. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, v. 103, p. 215-232.
- Navarro, P., Rivera, M., Monge, R. 2010. Geología y metalogenia del Grupo Calipuy (volcanismo cenozoico), segmento Santiago de Chuco, Norte del Perú. *Boletín del INGEMMET, Serie D, Estudios especiales*, v. 3, 150 p.
- Noble, D., McKee, E. 1999. The Miocene metallogenic belt of central and northern Peru. In: Skinner, B.J. (ed.), *Geology and ore deposits of the Central Andes*. Society of Economic Geologists, Special Publication 7, p. 155-193.
- Rivera, M., Monge, R., Navarro, P. 2005. Nuevos datos sobre el volcanismo cenozoico (Grupo Calipuy) en el Norte del Perú (departamentos de La Libertad y Ancash). *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, v. 99, p. 7-21.
- Romero, D., Quispe, J. 2008. Control estructural de la cuenca del Jurásico-Cretácico (grupos Chicama y Goyllarisquiza) del Perú centro-norte. Resúmenes, XIV Congreso Peruano de Geología, Lima, 6 p.