

# CONTEXTO TECTÓNICO DE LA ZONA VOLCÁNICA DEL PURACÉ Y PROVINCIA ALCALINA DEL VALLE SUPERIOR DEL MAGDALENA

(Tectonic context of the volcanic area of Purace and alkaline province of the upper Magdalena valley)

María Luisa Monsalve\* y Mónica Arcila\*\*

Ingeominas, Colombia, \*mmonsalve@ingeominas.gov.co, \*\*marcila@ingeominas.gov.co

(Recibido el 20 de mayo de 2009 y aceptado el 18 de junio de 2009)

## Resumen:

Conocido que la actividad sísmica de una región proporciona rasgos generales de su contexto geodinámico, este trabajo analiza eventos sísmicos en la zona del volcán Puracé, y su relación con los procesos que se producen desde el límite convergente de las placas Nazca y Suramérica. Bajo el continente, la sismicidad es difusa y no se tienen suficientes eventos para precisar una zona de Benioff. La ausencia de sismos de profundidad intermedia evidencia que la corteza oceánica que está subduciendo es joven y caliente, por lo que pierde rigidez para producir sismos y necesita poco tiempo para su asimilación en el manto.

Este contexto tectónico tiene validación en el vulcanismo reciente en el valle superior del Magdalena, donde se reconocen magmas con características geoquímicas que involucran aporte mantélico en su génesis. Adicionalmente, se reporta tendencia adakítica para magmas del volcán Puracé, que estaría relacionada con una dorsal fósil en la placa subducente bajo el SW de Colombia, modelo que igualmente explicaría la provincia alcalina en el retroarco. La hipótesis propuesta reconcilia modelos termales con observaciones geoquímicas, y representa una amplia implicación para el estudio de magmatismo de arco y de la evolución termal en márgenes convergentes.

**Palabras clave:** subducción dorsal fósil, adakita, basaltos alcalinos, Puracé, provincia alcalina

## Abstract:

It is well known that seismic activity allows the understanding of the region's geodynamic general characteristics. This paper analyses seismic events around Purace volcano and their relationship with the processes happening at the convergent margin between the South American and Nazca plates. The seismicity is randomly distributed beneath the continent and there are not enough events to properly define a Benioff Zone. The absence of seismicity at intermediate depth suggests that the subducting oceanic crust, is young and hot; therefore, it is less rigid and takes less time to be incorporated in the mantle.

This is validated further by the recent volcanism in the upper Magdalena valley, where there are magmas with identifiable mantle input in their genesis. In the other hand, there are adakitic magmas in the Purace volcano which could be related to the presence of a paleo-ridge in the subducting plate underneath the SW of Colombia; this model also explains the alkaline province in the back-arc. The proposed hypothesis reconciles the thermal models with geochemical information and makes a significant contribution to the study of arc magmatism and the thermal evolution of convergent margins.

**Key words:** paleo-ridge subduction, adakitic, alkaline basalts, Purace, provincia alcalina

## 1. INTRODUCCIÓN

La distribución, evolución y tipo de vulcanismo está íntimamente ligado, entre otros factores, al marco tectónico de una región. En el caso de márgenes continentales activas, las variaciones en el vulcanismo pueden ser respuesta, además de procesos magmáticos como la diferenciación, contaminación, etc., a modificaciones en el régimen tectónico, resultado de cambios en la placa subducente (edad, espesor, ángulo de subducción) o presencia de rasgos tectónicos como dorsales o fallas transformantes.

Se seleccionó el área volcánica del Puracé y el valle superior del Magdalena, considerando la existencia de datos geoquímicos, geofísicos y sismológicos, para proponer una interpretación sobre la relación entre el marco tectónico y la petrogénesis de los magmas que alimentan el vulcanismo reciente en esta zona (ver figura 1)

## 2. GENERALIDADES

La geometría de la placa de Nazca bajo Suramérica ha sido analizada y evaluada por diversos autores a partir de

la distribución de la sismicidad mundial (Baranzagi e Isacks, 1976; Hall y Wood, 1985; Gutscher, et al., 1999, 2000), utilizando datos de redes mundiales y regionales. En general, todos estos estudios sugieren la presencia de una placa de Nazca con una geometría muy heterogénea y caracterizada principalmente por la presencia de diferentes modos de subducción bajo el continente: una subducción normal y otra subhorizontal ("flat slab"). Así mismo, proponen una segmentación longitudinal a lo largo de la cordillera de Los Andes, reconociendo varios segmentos en la parte septentrional de la misma. En Ecuador se observa el efecto de la convergencia de la dorsal de Carnegie, que produce "flotación" de la placa subducente, con el consecuente efecto en la sismicidad y el vulcanismo asociado, distribuidos en áreas de mayor amplitud, sin que se puedan reconocer las bandas por profundidad que caracterizan la subducción.

Trabajos con diferentes enfoques han planteado las características de la subducción de la placa de Nazca bajo el occidente de Colombia. Case, et al. (1971), con base en anomalías gravimétricas, propone una zona de subducción en la costa pacífica colombiana. En los años 1973 y 1978, exploraciones geofísicas en el marco de los proyectos Nariño I, II y III, analizaron la transición

océano-continente en el occidente colombiano, planteando diferentes interpretaciones para la estructura (subducción / obducción) y acoplamiento entre la corteza oceánica y la corteza continental (Ramírez y Aldrich, 1977; Goberna, 1981). Pennington (1981) relocalizó la sismicidad y obtuvo soluciones de mecanismos focales para la zona de Panamá y Colombia, e interpretó y caracterizó tres segmentos de corteza oceánica subducida.

El vulcanismo en Los Andes ha sido dividido en cuatro zonas principales, basado en el carácter del vulcanismo cenozoico (Thorpe y Francis, 1979, Thorpe, 1982; Stern y Kilian, 1996, Ramos 1999): zona volcánica austral (ZVA), zona volcánica sur (ZVS), zona volcánica central (ZVC) y zona volcánica norte (ZVN). Esta última contiene el vulcanismo de Ecuador y Colombia. La diferencia entre ellas es atribuida a variaciones en el espesor, edad y ángulo de subducción de la placa oceánica y a cambios en la composición y espesor de la corteza (Harmon, et al., 1984).

En Colombia, el vulcanismo se localiza principalmente en la cordillera central, y hacia el SW se distribuye en el valle interandino Cauca-Patía y en la cordillera occidental. Adicionalmente, existe vulcanismo alcalino localizado en el valle superior del Magdalena, entre las cordilleras central y oriental.

El volcán Puracé (2°19'01"N; 76°23'53"W), en la cordillera central de Colombia, es el extremo NW de la cadena volcánica de Los Coconucos (CVCH), constituida por 12 centros eruptivos. Este vulcanismo, así como la estructura más antigua de Chagartón, ha sido interpretado como vulcanismo resurgente de la megaestructura caldérica de Paletará del plio-plestoceno (Torres, et al., 1999). Al E de la CVCH, en el valle superior del Magdalena, se ha identificado una serie de volcanes (Tello y Hernandez, 1976; Kroonemberg, 1987; Velandia, et al., 2001), denominados por Kroonemberg, et al., (1987) como "Provincia Alcalina". Análisis químicos en productos del volcán Puracé revelan una tendencia adakítica en su composición. En la zona volcánica Norte de Los Andes, este tipo de magmas ha sido, igualmente, identificado en el Ecuador (Robin, et al., 1997; Samaniego, et al., 1998, 2002, 2005; Beate, et al., 2001; Bourdon, et al., 2002; 2003). La "Provincia Alcalina" está caracterizada por productos con composición ultramáfica a toleítica (Kroonemberg, et al., 1982; 1987; Schmitt, 1983).

### 3. MARCO TECTÓNICO

Para la formulación del marco tectónico se realizaron análisis a dos escalas: uno regional, para evidenciar el límite de placas y caracterizar el proceso de subducción; y

el otro en el área del volcán Puracé, para identificar presencia de sismicidad de profundidad intermedia, que permita inferir la geometría de la zona de Benioff en este segmento.

En el análisis regional se consideró la morfología del fondo oceánico, que brinda información sobre los procesos pasados y presentes; la edad de la placa subducente, y la distribución de la sismicidad. Para la interpretación morfológica se utilizó el modelo digital de elevaciones GEBCO\_08, que reúne e integra información de diferentes bases de datos, con resolución aproximada de 900m x pixel, y se generó un mapa de sombreado artificial de la topografía iluminado desde el norte (ver figura 1, página siguiente).

La parte oriental de la cuenca de Panamá, en el occidente de Colombia, se relaciona con un fondo oceánico formado en un centro de expansión altamente asimétrico (Cocos - Nazca), y la edad de la placa es ligeramente mayor en el extremo norte (20 - 25 Ma), frente a la litosfera que subduce en el centro y sur (10 - 20 Ma), formada en el centro de expansión fósil de Buenaventura (Barckhausen, et al., 2001). Si bien estas diferencias de edad no son grandes, por tanto su incidencia en el buzamiento de la placa no debe ser importante, las irregularidades que representan estos centros de expansión fósil sí deben modificar el espesor de la litosfera, su flotabilidad, su grado de acoplamiento y la formación de desgarres en la placa.

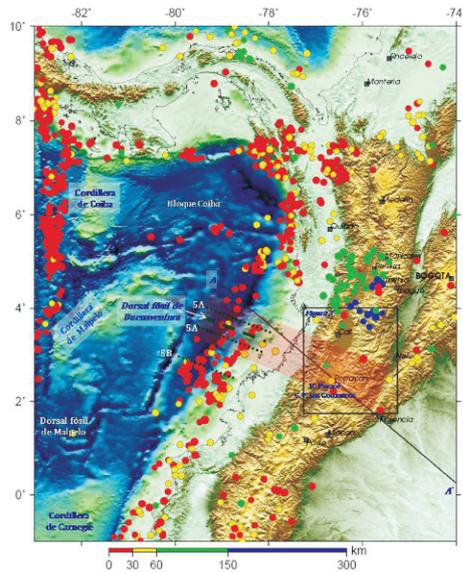
La distribución de sismos permite reconocer los principales rasgos tectónicos asociados a los límites de placas y la subducción en el occidente de Colombia. A diferencia de la zona centro occidente del país, en el suroccidente no se ha localizado sismicidad suficiente para definir una zona de Benioff. Para esta ausencia, Pennington (1981) postula algunas explicaciones, de entre las cuales, con la información disponible, se puede argumentar que la corteza que está subduciendo es en extremo joven y caliente, por lo que rápidamente pierde la tensión necesaria para producir sismos. La corteza oceánica joven necesitaría muy poco tiempo para ser asimilada en el manto y fluir plásticamente.

Secciones verticales perpendiculares a la dirección de la fosa permiten caracterizar la geometría del plano de Benioff y la profundidad de la sismicidad asociada. Para describir la subducción en el segmento asociado al vulcanismo del Puracé y la provincia alcalina del valle superior del Magdalena, se realizó e interpretó una sección perpendicular a la fosa (ver figura 2, página siguiente).

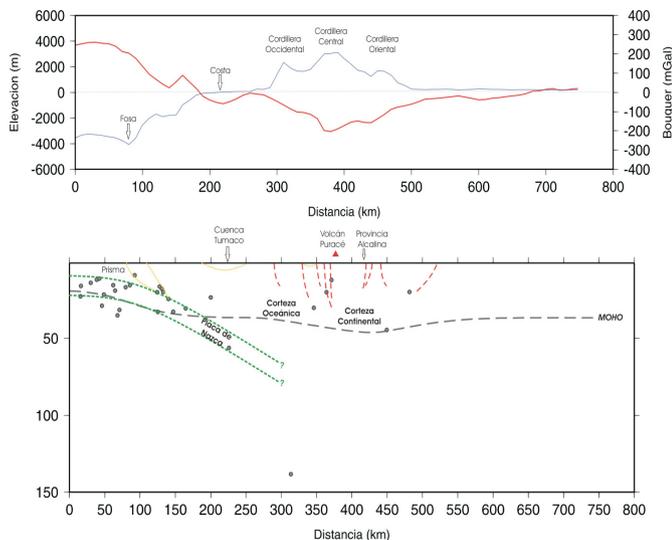
Dicha sección incluyó información topográfica, gravimétrica (anomalía Bouguer total), estimaciones de

la profundidad del moho por inversión de anomalías gravimétricas, y distribución de la sismicidad con profundidad bien determinada.

De manera general, la información analizada permite definir una placa subducente bajo el occidente de Colombia, que alcanza una profundidad cercana a los 70 km bajo en la cordillera occidental, no siendo posible seguirla más al oriente.

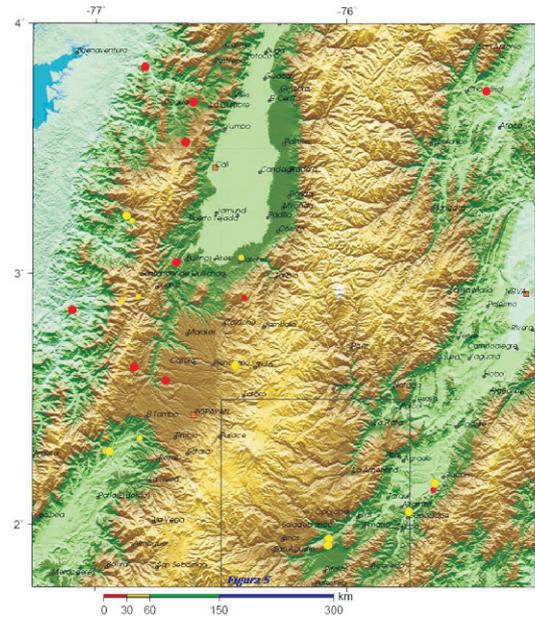


**Figura 1.** Mapa sombreado artificial de la batimetría y topografía en el occidente colombiano, en el que se identifican los principales rasgos en la placa subducente y la sismicidad (catálogo de Engdahl, et al., 1998), según escala de color. Con línea verde se indica la dorsal fósil de Buenaventura propuesta por Barckhausen, et al. (2001); líneas punteadas, isócronas 5A y 5B (12 - 15 Ma) y zona sombreada en rojo, proyección bajo el SW de Colombia. La línea A - A', sección perpendicular a la fosa de la Figura 2, y recuadro, zona detallada en Figura 3.



**Figura 2.** Sección vertical perpendicular a la fosa en el SW colombiano. Gráfico superior, perfil de la topografía y anomalía gravimétrica; gráfico inferior, interpretación del perfil postulando la geometría de la placa subducida.

El análisis detallado de la sismicidad en el área del Puracé (ver figura 3) incluyó relocalización de eventos tectónicos locales registrados en el suroccidente colombiano, mostrando ausencia de eventos de profundidad intermedia en la zona, en la que predominan sismos de profundidad superficial (< 60 km) (Muñoz, 2008).



**Figura 3.** Sismos tectónico-locales en el área de interés, relocalizados por el Observatorio Vulcanológico de Popayán (Muñoz, 2008).

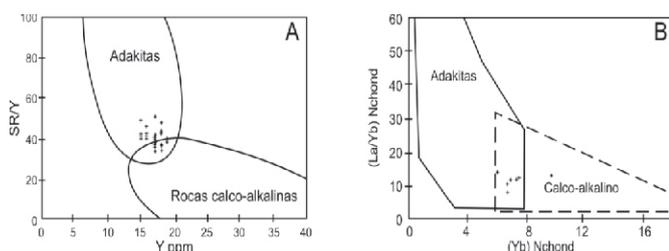
#### 4. GEOQUÍMICA

El magmatismo en márgenes convergentes resulta de la fusión de peridotita de la cuña mantélica inducida por el flujo de fluidos que se originan por deshidratación de sedimentos que cubren la placa oceánica, subducidos o minerales hidratados de la placa subducida (Wyllie, 1979; Schmidt y Poli, 1998; Van Keken, 2003). Algunas lavas de márgenes convergentes, denominadas adakititas, también pueden presentar un componente de la fusión de la placa oceánica subducida, caracterizándose por tener concentraciones bajas de Y y HREE, alto La/Yb, > 20, alto Sr (> 400ppm), bajo HFSE, y  $87\text{Sr}/86\text{Sr} < 0,7040$ . El bajo contenido de HREE de las adakititas es interpretado como reflejar la presencia de granate u hornblenda en el residuo de la fusión parcial de su fuente (Defant, and Drummond, 1990; Martin, 1986; Kay, et al., 1993). Estos minerales no son fases residuales típicas durante la génesis de magmas calco-alcalinos. Se piensa que el origen de las adakititas involucra material fundido de la corteza oceánica subducida que ha sido metamorfoseada a eclogita. La producción de adakititas requiere condiciones térmicas anómalas (Drummond y Defant, 1990; Peacock, 1990), tales como: 1) subducción y fusión de litosfera oceánica joven (< 20 Ma) aún caliente, como

sucede en el sur de Chile (Martin, 1999); 2) subducción de litosfera oceánica más antigua y fría, asociada con tectónica inusual, tal como una ventana litosférica o desgarrones en la placa oceánica ("tears") que permiten el flujo del manto sobre y alrededor de los bordes de la litosfera subducida, como ha sido reconocido en el arco aleutiano, Kamchatka y sur del Japón (Yogodziski, et al., 1995; Davaillea y Jonathan, 2004), y/o 3) fusión de la corteza continental inferior, asociada con una corteza gruesa o de laminación de la misma (Kay, et al., 2005).

Los productos de la cadena volcánica de Los Coconucos y la caldera de Chagartón presentan características particulares, como su alto contenido en K, respecto a otros volcanes colombianos (Marriner y Millward, 1984; Monsalve y Pulgarín, 1993; Monsalve y Pulgarín, 1999; Monsalve, 2000). Adicionalmente, datos geoquímicos de productos del Puracé muestran que éstos están más enriquecidos en LILE que otros volcanes (Marriner y Millward, 1984; Droux y Delaloye, 1996). Las lavas de Puracé contienen altas concentraciones de Sr (>550 - 1000 ppm), bajos contenidos de Y (entre 15 a 23 ppm) y de HREE (Yb entre 1,2 a 2,0 ppm) y presentan fuerte fraccionamiento en los patrones de REE -  $(La/Yb)_N > 10$ .

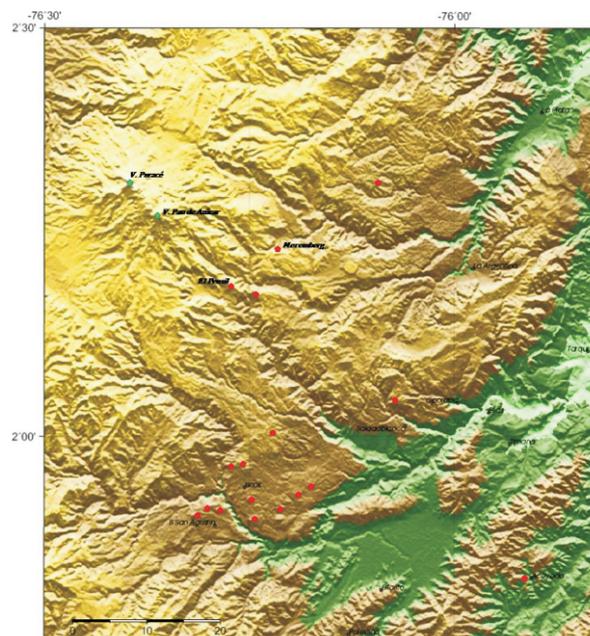
El contenido de elementos traza de los productos del volcán Puracé está dentro del campo de las adakititas, como puede verse en los diagramas Sr/Y vs Y, y  $(La/Yb)_N$  vs  $Yb_N$  (ver figura 4, secciones 4A y 4B). Las relaciones isotópicas,  $^{87}Sr/^{86}Sr$  en dos muestras, están en un rango de 0,70430 a 0,70445 (Marriner y Millward, 1984; Murcia, 1982). Tales valores isotópicos son ligeramente más altos que la mayoría de las adakititas y son similares a valores presentados en otros volcanes colombianos y ecuatorianos (James, 1982; Murcia, 1982; Marriner y Millward, 1984; James y Murcia, 1984; Francis, et al., 1977; Hawkesworth, et al., 1979).



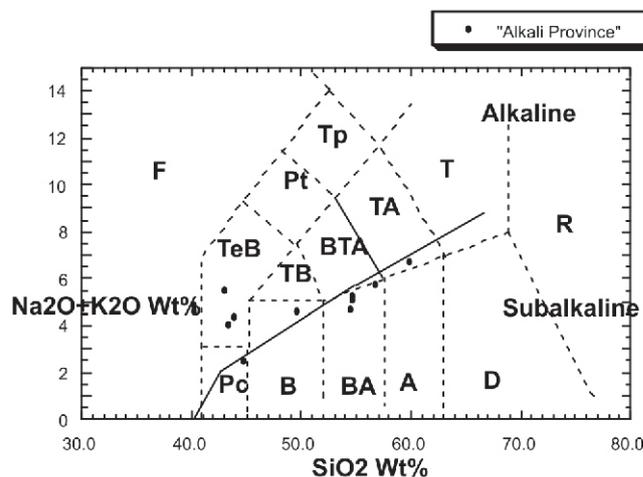
**Figura 4.** Diagramas discriminatorios de adakititas. A: Sr/Y vs Y, campos según Drummond y Defant (1990); B:  $La/Yb$  condrita-normalizada vs  $Yb$  condrita-normalizada, campos según Martin (1986). Datos de Marriner y Millward (1984), Droux y Delaloye (1996) y Monsalve, et al. (2009).

En cuanto a la provincia alcalina (Kroonenberg, et al., 1987), está localizada en el valle superior del Magdalena. La figura 5 (ver) muestra la distribución aproximada de esta provincia respecto a la cadena volcánica de Los Coconucos. Observaciones de algunos centros volcánicos de composición básica a ultrabásica fueron

reportadas por Bergt (1899, en Kroonenberg, et al., 1982), y los centros volcánicos del área de San Agustín son descritos por Tello y Hernández (1976), que atribuyen una actividad en el holoceno, debido a su morfología bien conservada, y Velandia, et al. (2001), que han identificado nuevos centros volcánicos. Análisis geoquímicos del vulcanismo alcalino fueron realizados por Schmitt (1983) y Kroonenberg, et al. (1987), que describen tres grupos principales de rocas: lavas ultrabásicas en la región de Acevedo, basaltos alcalinos olivínicos en el área de San Agustín, y andesitas en los volcanes de Meremberg y El Pensil (ver figura 6).



**Figura 5.** Distribución del vulcanismo en el suroccidente del departamento del Huila - valle superior del Magdalena (Modificado de Velandia, et al., 2001). Símbolos rojos, volcanes de la provincia alcalina del valle superior del Magdalena.



**Figura 6.**  $SiO_2$  (wt %) vs álcalis total ( $Na_2O + K_2O$ , wt %) para la provincia alcalina del valle superior del Magdalena. El límite entre los campos alcalino y subalcalino (línea continua) fue tomado de Miyashiro (1978). Los campos para la clasificación TAS se muestran en líneas punteadas (tomado de Le Bas, et al., 1986). F: foidita; Pc: picro-basalto; B: basalto; BA: andesita basáltica; TeB: tefrita o basanita; TB: traquibasalto; Pt: fonotefrita; Tp: tefrifonolita; BT: traqui-andesita basáltica; TA: traquiandesita; T: traquita; R: riolita. Datos tomados de Kroonenberg et al. (1987).

Adicionalmente, Kroonenberg, et al. (1987), reportan valores altos en Nb (30-70) ppm para los productos más básicos y 20 ppm para los toleíticos. Estos autores, además, anotan que esta área es infrayacida por una zona asísmica, e interpretan el vulcanismo como producto de la fusión parcial del manto superior del tipo lherzolita con granate. Penington (1981) sugiere que este vulcanismo es debido a la subducción de un centro de expansión cerca de la latitud 2°N. Recientemente, Borrero y Castillo (2006) proponen una ventana mantélica dada por la subducción del rift de Malpelo, como mecanismo que permite, en este sector, el ascenso del magma de origen astenosférico hacia la superficie. Zhang, et al. (2005), anota que los basaltos ricos en Nb, si son sódicos ( $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 1$  y con  $\text{Na}_2\text{O} > 3$  wt%), pueden derivarse de una fuente mantélica metazomatizada por fluidos de la loza subducente; la asociación de adakitas y basaltos altos en Nb son comunes (Sajona, et al., 1994; Bourgois y Michaud, 2001; Polat y Kerrich, 2001), especialmente en ambientes tectónicos de desgarre o ventanas astenosféricas (Thorkelson y Breitsprecherb, 2005).

## 5. CONCLUSIONES Y RESULTADOS

Los datos geoquímicos de los productos del volcán Puracé muestran una firma adakítica, que difiere de la composición calcoalcalina típica. Se propone que la tendencia adakítica en el volcán Puracé está relacionada con la presencia bajo el SW de Colombia de la extensión proyectada de la dorsal fósil de Buenaventura, que constituiría además una zona de debilidad para una rotura en la placa de Nazca, modelo similar al que adopta un desgarre litosférico con subducción de bajo ángulo de la dorsal de Carnegie, en el Ecuador. La provincia alcalina en el retroarco podría igualmente ser explicado con este modelo. Como ha sido indicado por varios autores, los basaltos altos en Nb son frecuentemente encontrados en asociación con adakitas sugiriendo que estos pueden ser producto de la fusión parcial del manto metazomatizado por fluidos de la placa oceánica subducente.

La ausencia de sismicidad de profundidad intermedia evidencia que la corteza que está subduciendo es en extremo joven y caliente, o ésta ya ha sido asimilada por el manto.

La hipótesis propuesta reconcilia modelos termales con observaciones geoquímicas y representa una amplia implicación para el estudio de magmatismo de arco y de la evolución termal en márgenes convergentes.

## 6. REFERENCIAS

- Baranzagi, M.; Isacks, B., (1976). Spatial distribution of earthquakes and subduction of the Nazca plate beneath South America. *Geology*, 4: 686-692
- Barckhausen, U., Ranero, C.R., Von Huene, R., Cande, S.C., Roeser, H.A., (2001). Revised tectonic boundaries in the Cocos Plate off Costa Rica; implications for the segmentation of the convergent margin and for plate tectonic models. *J. Geophys. Res.*, 106: 19207-19220
- Beate, B., Monzier, M., Spikings, R., Cotten, J., Silva, J., Bourdon, E. and Eissen, J.P., (2001). Mio-Pliocene adakite generation related to flat subduction in southern Ecuador: the Quimsacocha volcanic center. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 192: 561-570
- Borrero, C.A., y Castillo, H., (2006). Vulcanitas del S-SE de Colombia: retro-arco alcalino y su posible relación con una ventana astenosférica. *Boletín de Geología*, Vol 28 (2): 23-34
- Bourdon, E., Eissen, J.P., Monzier, M., Robin, C., Martin, M., Cotton J. and Hall, M.L., (2002). Adakite-like lavas from Antisana volcano: evidence for slab melt metasomatism beneath the Andean Northern Volcanic Zone. *J. Petrol.*, 43: 199-217
- Bourdon, E., Eissen, J.P., Gutscher, M-A., Monzier, M., Hall, M.L. and Cotton, J., (2003). Magmatic response to early aseismic ridge subduction: the Ecuadorian margin case (South America). *Earth Planet. Sci. Lett.*, 205: 123-138
- Bourgois, J. and Michaud, F., (2001). Late miocene adakites and Nb-enriched basalts from Vizcaino Peninsula, Mexico: Indicators of east pacific rise subduction below southern Baja California *Geology*, 29: 531-534
- Case, J., Duran, S., López, R., Moore, W., (1971). Tectonic investigations in western Colombia and eastern Panama. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 82: 2685-2712
- Davaillea, A. and Jonathan, M.L., (2004). Thermal modeling of subducted plates: tear and hotspot at the Kamchatka corner. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 226-304
- Defant, M.J. and Drummond, M.S., (1990). Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347: 662-665
- Droux, A. and Delaloye, M., (1996). Petrography and geochemistry of plio-quadernary calc-alkaline volcanoes of southwestern Colombia. *J. South Am. Earth Sci.*, 9: 27-41
- Engdahl, E.R., Van Der List, R.D. and Buland, R., (1998). Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth relocation. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 88: 722-743
- Francis, P., Moorbath, S. and Thorpe, R., (1977). Strontium isotope data for recent andesites in Ecuador and north Chile. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 37: 197-202
- GEBCO\_08 Grid, version (2009/2002), Disponible en: <http://www.gebco.net>
- Goberna, J.R., 1981. Investigaciones geofísicas sobre las estructuras océano-continetales del occidente colombiano. Instituto Geofísico - Universidad Javeriana. Bogotá. 138 p.

- Gutscher, M.A., Malavieille, J., Lallemand, S. and Collot, J.Y., (1999). Tectonic segmentation of the north Andean margin. Impact of the Carnegie ridge collision. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 168: 255-270
- Gutscher, M.A., Spakman, W., Bijwaard, H. and Engdahl, E.R., (2000). Geodynamics of flat subduction: seismicity and tomographic constraints from the Andean margin. *Tectonics*, 19 (5): 814-833
- Hall, M., Wood, C., (1985). Volcano-tectonic segmentation of the northern Andes. *Geology*, 13: 203-207
- Harmon, R.S., Barreiro, B.A., Moor bath, S., Hoefs, J., Francis, P.W., Thorpe, R.S., Déruelle, B., McHugh, J. and Viglino, J.A., (1984). Regional O-, Sr-, and Pb-isotope relationships in late cenozoic calc-alkaline lavas of the Andean cordillera. *J. Geol. Soc. London*, 141: 803-822
- Hawkesworth, C.J., Norry, M.J., Roddick, J.C., Baker, P.E., Francis, P.W. and Thorpe, R.S., (1979).  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , and incompatible element variations in calc-alkaline andesites and plateau lavas from south America. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 42-57
- James, D.E., (1982). A combined O, Sr, Nd, and Pb isotopic and trace element study of crustal contamination in central Andean lavas. I. Local geochemical variations, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 57: 47-62
- James, D.E. and Murcia, L.A., (1984). Crustal contamination in northern Andean volcanics. *J. Geol. Soc. Lond.*, 141: 823-830
- Kay, S.M., Ramos, V.A. and Márquez, M., (1993). Evidence in Cerro Pampa volcanic rocks for slab-melting prior to ridge-trench collision in southern South America. *J. Geol.*, 101: 703-714
- Kay, S.M., Godoy, E. and Kurtz, A., (2005). Episodic arc migration, crustal thickening, subduction erosion, and magmatism in the south-central Andes. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 117: 67-88
- Kroonenberg, S., Leon, L., Pastana, J. y Pessoa, M., (1981). Ignimbritas pliopleistocénicas en el suroeste del Huila, Colombia, y su influencia en el desarrollo morfológico. *Rev. CIAF*, 6: 293-314
- Kroonenberg, S., Pichler, H. and Diederix, H., (1982). Cenozoic alkalibasaltic to ultrabasic volcanism in the uppermost Magdalena valley, southern Huila department, Colombia. *Geología Norandina* 5: 19-26
- Kroonenberg, S., Pichler, H. and Schmitt-Riegraf, C., (1987). Young alkali-basaltic to nephelinitic volcanism in the southern Colombian Andes-origin by subduction of a spreading rift? *Zbl. Geol. Paläont.*, 1: 919-936
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeinsen, A. and Zannettin, B., (1986). A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*. 27: 745-750
- Marriner, G.F. and Millward, D., (1984). Petrochemistry of cretaceous to recent volcanism in Colombia. *J. Geol. Soc. London*, 141: 473-486
- Martin, H., (1986). Effect of steeper archaic geothermal gradient on geochemistry of subduction-zone magmas. *Geology*, 14: 753-756
- Martin, H., (1999). Adakitic magmas: modern analogues of archaic granitoids. *Lithos*, 46: 411-429
- Miyashiro, A., (1978). Nature of alkalic volcanic rock series. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 66: 91-104
- Monsalve, M.L., (2000). Catálogo de volcanitas neógenas de Colombia. *Formación Coconucos. Ingeominas*, 31 p.
- Monsalve, M.L., Correa, A.M. y Arcila, M., (2009). Firma adakítica en los productos recientes de los volcanes
- Monsalve, M.L. y Pulgarín, B., (1993). Mapa preliminar de amenaza volcánica potencial del volcán Puracé. *Rev. Ingeominas*, 2: 3-27
- Monsalve, M.L. y Pulgarín, B., (1999). Cadena volcánica de los Coconucos (Colombia), centros eruptivos y productos recientes. *Boletín Geológico Ingeominas*, 37: 17-51
- Muñoz, E.F., (2008). Informe final actividades orden prestación de servicio BTA-121/08. Proyecto Cartografía geológica en el vulcanismo del SW de Colombia. *Ingeominas, Popayán*, 26 p.
- Murcia, L.A., (1982). El vulcanismo plio-cuatemario de Colombia: depósitos piroclásticos asociados y mediciones isotópicas de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  y  $^{18}\text{O}$  en lavas de los volcanes Galeras, Puracé y Nevado del Ruiz. *Publ. Geol. Esp. Ingeominas*, 10: 3-17
- Peacock, S. M., (1990). Fluid processes in subduction zones. *Science*, 248: 329-337
- Peccerillo, A. and Taylor, S.R., 1976. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 58: 63-81
- Pennington, W., (1981). Subduction of the Eastern Panama basin and sismotectonics of northwestern south America. *J. Geophys. Res.*, 86: 10753-10770
- Polat, A. y Kerrich, R., (2001). Magnesian andesites, Nb-enriched basalt-andesites, and adakites from late-archaic 2,7 ga wawa greenstone belts, superior province Canada: implications for late archaic subduction zone petrogenetic processes. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 141: 36-52
- Ramírez, J.E., Aldrich, L.T., 1977. La transición océano-continente en el suroeste de Colombia. *Instituto Geofísico - Universidad Javeriana. Bogotá*, 313 p.
- Ramos, V.A., (1999). Plate tectonic setting of the Andean cordillera. *Episodes*, 22: 183-190
- Robin, C., Hall, M., Jimenez, M., Monzier, M. and Escobar, P., (1997). Mojanda volcanic complex (Ecuador): Development of two adjacent

- contemporaneous volcanoes with contrasting eruptive styles and magmatic suites. *J. South Am. Earth Sci.*, 10: 345-359
- Sajona, F. G., Bellon, H., Maury, R. C., Pubellier, M., Cotton, J. y Rangin, C., (1994). Magmatic response to abrupt changes in tectonic setting: Pliocene-Quaternary calcalkaline lavas and Nb-enriched basalts of Leyte and Mindanao (Philippines). *Tectonophysics*, 237: 47-72
- Samaniego, P., Monzier, M., Robin, C. and Hall, M.L., (1998). Late holocene eruptive activity at Nevado Cayambe Volcano, Ecuador. *Bull. Volc.*, 59: 451-459
- Samaniego, P., Martin, H., Robin, C. and Monzier, C.M., (2002). Transition from calcalkalic to adakitic magmatism at Cayambe volcano, Ecuador: insights into slab melts and mantle wedge interactions. *Geology*, 30: 967-970
- Samaniego, P., Martin, H., Monzier, M., Robin, C., Fornari, M., Eissen J.P. and Cotton, J., (2005). Temporal evolution of magmatism in the northern volcanic zone of the Andes: the geology and petrology of Cayambe volcanic complex (Ecuador). *J. Petrol.*, 46: 2225-2252
- Schmitt, C., (1983). Young volcanism in the cordillera ranges of southern Colombia. *Zbl. Geol. Palaont. Teil I*, 3/4: 318-328
- Schmidt, M.W. and Poli, S., (1998). Experimentally based water budgets for dehydrating slabs and consequences for arc magma generation. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 163: 361-379
- Stern C.R. and Kilian R., (1996). Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Andean austral volcanic zone. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 123: 263-281
- Tello, H. y Hernández, T., (1976). Investigación geológica en el Parque Arqueológico de San Agustín (Huila). Tesis grado, U. Nal., Bogotá, 30 p.
- Thorpe, R. S. and Francis, P. W., (1979). Variations in Andean andesite compositions and their petrogenetic significance. *Tectonophysics*, 57: 53-70
- Thorpe, R.S., Francis, P.W., Hammill, M. and Baker, M.C.W., (1982). The Andes, In: R. S. Thorpe (Ed.), *Andesites: orogenic andesites and related rocks*, John Wiley and Sons, Chichester, UK, 187-205
- Thorkelson, D. J. and Breitsprecher, K., (2005). Partial melting of slab window margins: genesis of adakitic and non-adakitic magmas. *Lithos*, 79: 25-41
- Torres, P., Monsalve, M.L., Pulgarín, B. y Cepeda, H., (1999). Caldera de Paletará: aproximación a la fuente de las ignimbritas del Cauca y Huila (Colombia). *INGEOMINAS, Bol. Geol.*, 37: 1-15
- Van Keken, P.E., (2003). The structure and dynamics of the mantle wedge. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 215: 323-338
- Velandia, F., Núñez, A. y Marquinez, G., (2001). Mapa geológico del departamento del Huila. Escala 1:300.000. Memoria explicativa. Ingeominas, Bogotá, 153 p.
- Wyllie, P. J., (1979). Magmas and volatile components. *Am. Mineral.*, 64: 469-500
- Yogodzinski, G.M., Kay, R.W., Volynets, O.N., Koloskov, A.V. and Kay, S.M., (1995). Magnesian andesite in the western Aleutian Komandorsky region: Implications for slab melting and processes in the mantle wedge. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 107: 505-519.
- Zhang, H., Niu, H., Sato, H., Yu, X., Shan, Q., Zhang, B., Ito, J. and Nagao, T., (2005). Late Paleozoic adakites and Nb-enriched basalts from northern Xinjiang, northwest China: evidence for the southward subduction of the paleo-Asian oceanic plate. *The Island Arc*, 14: 55-68.