

VARIACIONES GEOQUIMICAS, LOCALES Y REGIONALES, EN EL FRENTE VOLCANICO CUATERNARIO DE LOS ANDES CENTRALES (17°30'-22°00'S), NORTE DE CHILE

GERHARDT WÖRNER

LEOPOLDO LOPEZ-ESCOBAR

STEPHEN MOORBATH

SUSAN HORN

JÜRGEN ENTENMANN

RUSSEL S. HARMON

JON D. DAVIDSON

Institut für Geowissenschaften, Postfach 3980, Universität Mainz, D-6500, Mainz, Alemania

Departamento de Geología, Universidad de Chile, Casilla 13518, Correo 21, Santiago-Chile, and

NERC-Isotope Geosciences Laboratory, Keyworth, Nottingham, NG12 5GG, Inglaterra

Department of Earth Sciences, Oxford University, Parks Rd., Oxford, OX1 3PR, Inglaterra

Institut für Geowissenschaften, Postfach 3980, Universität Mainz,

D-6500, Mainz, Alemania

NERC Isotope Geosciences Laboratory, Keyworth, Nottingham, NG12 5GG, Inglaterra

Department of Earth and Space Sciences, University of California, Los Angeles, CA 90024, EE.UU.

RESUMEN

Datos geoquímicos, obtenidos en muestras del sector 17°30'-22°00'S del frente volcánico cuaternario de los Andes Centrales, sugieren una participación relevante de la corteza continental en la génesis magmática de esta región. Una segmentación regional en la composición de los centros volcánicos y una interrupción significativa del volcanismo cuaternario entre los 19°10'-20°40'S (Altos de Pica) son características notables en este sector andino. Los centros ubicados al norte de los Altos de Pica (16°00'-19°09'S) difieren de los ubicados al sur (20°40'-28°00'S) en la abundancia de elementos trazas incompatibles y en la conducta de las razones isotópicas de Sr y Pb con el grado de diferenciación. Siendo la edad y composición de la corteza las únicas variables geofísicas de importancia entre 17°30' y 22°00'S, la segmentación regional parece reflejar una interacción de los magmas subcorticales con zonas corticales de diferente edad y composición. Esta interacción se interpreta como el resultado de un proceso, tipo MASH, llevado a cabo en la corteza inferior. Las variaciones locales en la composición del magma sugieren una evolución de la zona de MASH en respuesta al aumento del espesor cortical, ocurrida durante el Mioceno inferior a medio. La semejanza de la composición isotópica de las lavas de los conos monogenéticos meridionales con aquella de las lavas de la región septentrional se interpreta como el resultado de la interacción de sus magmas subcorticales con una corteza inferior, de tipo septentrional, extendida en profundidad hacia el sur.

Palabras claves: Geoquímica, Volcanismo cuaternario, Andes Centrales, Norte de Chile.

ABSTRACT

LOCAL AND REGIONAL GEOCHEMICAL VARIATIONS IN THE QUATERNARY VOLCANIC FRONT OF THE CENTRAL ANDES (17°30'-22°00'S), NORTHERN CHILE. Geochemical data, obtained in samples from the 17°30'-22°00'S sector of the Quaternary volcanic front of the Central Andes, suggest a significant involvement of the continental crust in the magmagenesis of this region. A regional segmentation in the composition of the volcanic centers and a gap in the Quaternary volcanism between 19°10' and 20°40'S (Altos de Pica zone) are important features in this Andean sector. Centers north of the Altos de Pica (16°00'-19°09'S) differ from those south of it (20°40'-28°00'S) in the abundance of incompatible trace elements and in the behaviour of the Sr- and Pb- isotopic ratios with degree of differentiation. Since the mean age and composition of the crust are the only important geophysical variables between 17°30' and 22°00'S, the regional segmentation seems to reflect an interaction of subcrustal magmas with crust of different age and composition. This interaction is interpreted as a MASH-type process occurring in the lower crust. Local variations in magma composition suggest a MASH zone that evolved in response to crustal thickening during the lower to middle Miocene. The isotopic composition of southern monogenetic cone lavas is similar to those of the northern region lavas and is interpreted to result from interaction of subcrustal magmas with northern-type lower crust extending southward at depth.

Key words: Geochemistry, Quaternary volcanism, Central Andes, Northern Chile.

INTRODUCCION

El volcanismo cuaternario de la zona volcánica central de los Andes (ZVC; 16°-28°S) es uno de los productos de la subducción de la placa oceánica de Nazca bajo la placa continental Sudamericana. Los

diferentes centros volcánicos de esta zona se distribuyen a lo largo de una franja, de orientación norte-sur, alcanzando elevaciones de 5.000 a 7.000 m s.n.m. y unos 2.000 m sobre su base. En esta zona

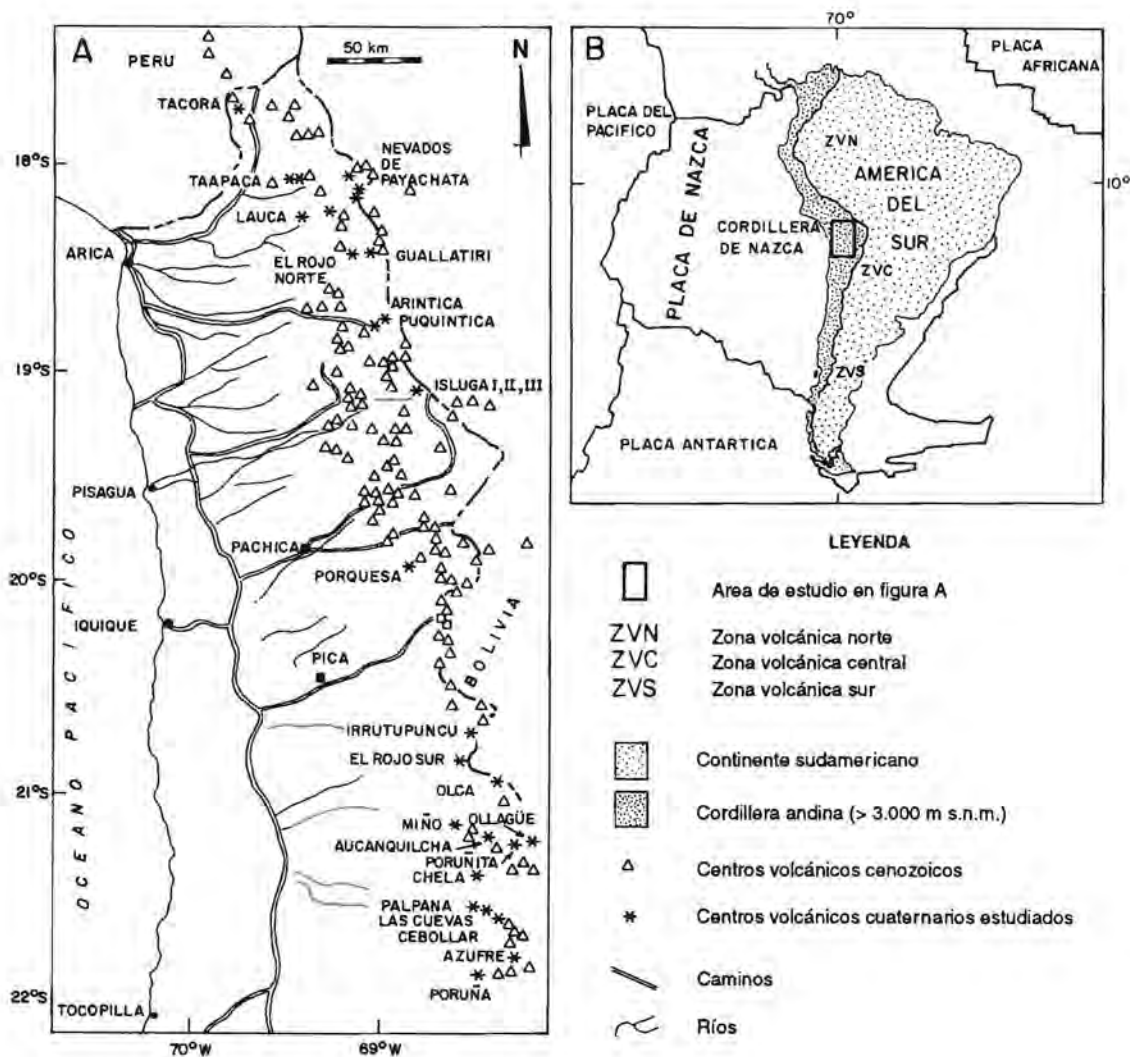


FIG. 1. Zona volcánica central (ZVC) de los Andes entre las latitudes 17° y 22°S. Con estrellas se muestra la ubicación de los centros volcánicos cuaternarios discutidos en este trabajo.

se ubican los volcanes más elevados del mundo.

En la ZVC, la fosa Chile-Perú es relativamente profunda (7.000 m) y, prácticamente, carece de sedimentos (Thornburg y Kulm, 1987). La corteza continental alcanza espesores superiores a los 50 km, llegando en algunos lugares a superar los 70 km (James, 1971 a,b). La corteza superior está formada por rocas precámbricas, intrusivos ordovícicos, lavas del Paleozoico Superior, rocas sedimentarias marinas mesozoicas, cubiertas por sedimentos continentales del Cretácico, aunque se desconoce la litología de sus partes media e inferior. Datos geofísicos muestran la existencia de una anomalía a nivel de la corteza media (10-50 km) que, probablemente, se relaciona con la presencia de fluidos corticales (Schwarz *et al.*, 1986). Los fluidos serían liberados por el segmento cortical subyacente, debido al engrosamiento que sufrió la corteza a partir del Mioceno (Isacks, 1988; Benjamin *et al.*, 1987). De acuerdo con los estudios de Isacks (1988), la corteza de la zona central de los Andes experimentó un acortamiento, engrosamiento y alzamiento notable durante el Mioceno inferior a medio. El alzamiento se habría iniciado hace unos 21 Ma (Lahsen, 1982) y acelerado hace unos 15 Ma (Benjamin *et al.*, 1987). Como consecuencia de esta orogénesis, la corteza se habría acortado en unos 250 km; su grosor habría aumentado, en promedio, de unos 40 a unos 65 km y la litósfera subcontinental se habría adelgazado de 140 a 70 km (Isacks, 1988). El aumento relativamente rápido del espesor cortical durante el Mioceno y el ascenso isostático de la región del altiplano habrían sido causados por: **a.** Un calentamiento y debilitamiento de la corteza en un régimen convergente; **b.** Un cambio en la velocidad y dirección de la placa, y **c.** Una compresión posterior por imbricación de la corteza superior.

Las fuentes potenciales que habrían contribuido a crear las características geoquímicas de los magmas de la ZVC de los Andes serían: la corteza oceánica subducida, el manto astenosférico, el manto litosférico, la corteza continental inferior y la corteza superior. Sin embargo, no existe acuerdo en cuanto a la contribución relativa de dichas fuentes. Así, por ejemplo, sobre la base de las variaciones en la composición isotópica y abundancia de los

elementos trazas, desde el Jurásico al Presente, Rogers y Hawkesworth (1989), postularon que los magmas de la ZVC de los Andes se originaron en un manto litosférico antiguo. Sin embargo, sobre la base de las variaciones geoquímicas observadas en sentido norte-sur, las que se correlacionan con la edad y composición de la corteza, en este trabajo se estima que es la corteza, y no una fuente litosférica, o una subducción de sedimentos, o la erosión tectónica, la causa más probable de las variaciones observadas.

Estudios geoquímicos realizados en la región de los Nevados de Payachata (18°10'S; Wörner *et al.*, 1988; Davidson *et al.*, 1990) permitieron detectar, en las rocas volcánicas, contenidos elevados de Sr, Ba y otros elementos trazas, junto con razones $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ significativamente bajas. Con el objeto de evaluar si estas características composicionales son comunes a otros centros volcánicos de la ZVC, se tomaron muestras de 31 centros (incluyendo aquéllos de la región de los Nevados de Payachata) ubicados entre las latitudes 17°30' y 22°S (Fig. 1). De las muestras recolectadas en terreno, la mayoría de las cuales cuentan con control estratigráfico (basado en criterios morfológicos y relaciones de contactos, (Horn, 1991), se seleccionaron 290 para ser analizadas por elementos mayores y trazas (117 de estos análisis aparecen en la Tabla 1, con excepción de aquéllos de la región de los Nevados de Payachata, publicados en Wörner *et al.*, 1988 y Davidson *et al.*, 1990). El número de muestras analizadas por centro varía entre 1 (volcán monogenético El Rojo Sur) y 132 (Nevados de Payachata). Las composiciones isotópicas de Sr se determinaron en 67 de las muestras que aparecen en la Tabla 1, las de Nd en 3, las de Pb en 44 y las de O en 33. Los métodos analíticos empleados aparecen en el Apéndice 1. Las muestras analizadas son, en su mayoría, de rocas volcánicas cuaternarias.

Los objetivos principales de este trabajo son: **1.** Documentar la composición química e isotópica disponible, no documentada previamente, de los centros volcánicos estudiados, y **2.** Evaluar el aporte cortical a las características geoquímicas de los magmas de la ZVC de los Andes.

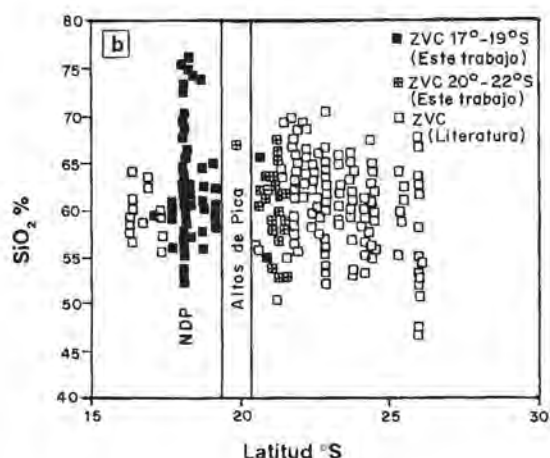
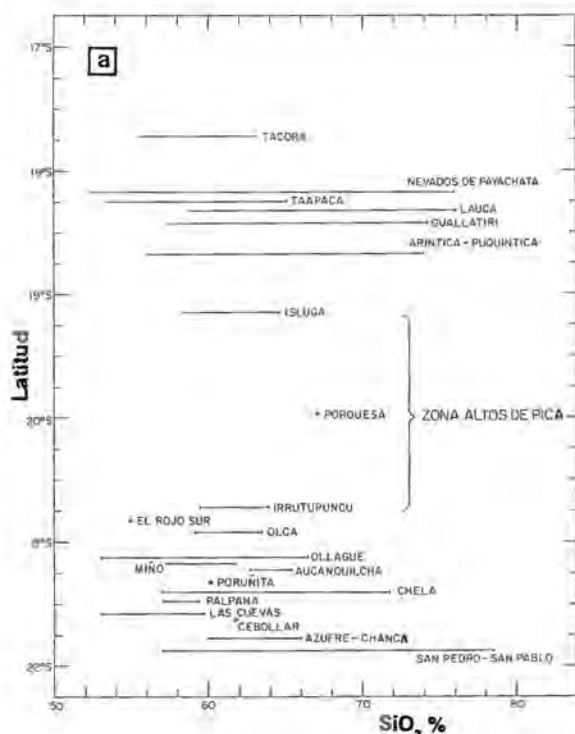


FIG. 2. a. Variación del contenido de SiO_2 con la latitud en la zona de estudio ($17^\circ\text{--}22^\circ\text{S}$); b. Variación del contenido de SiO_2 con la latitud entre 16° y 28°S . Nota: Las fuentes bibliográficas, de donde se tomaron datos, se muestran con asterisco en la sección Referencias.

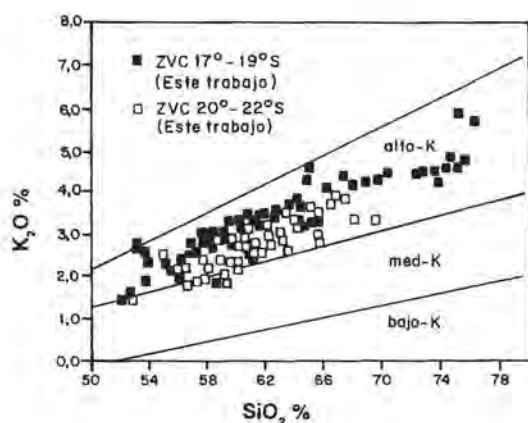


FIG. 3. Diagrama de variación $\text{K}_2\text{O}\text{--}\text{SiO}_2$. Nótese que aun cuando todas las muestras analizadas del frente volcánico de los Andes Centrales se ubican en el campo de las rocas volcánicas subalcalinas, ricas en K, de Pecerrillo y Taylor (1976), las rocas de los centros volcánicos ubicados al norte de la zona de los Altos de Pica ($19^\circ10'\text{--}20^\circ40'\text{S}$) tienden a presentar contenidos de K_2O más elevados que las pertenecientes a centros ubicados al sur de dicha zona.

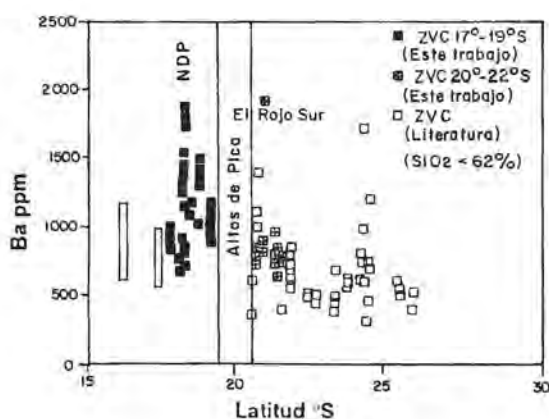


FIG. 4. Contenido de Ba en función de la latitud, entre $16^\circ30'$ y 26°S , de rocas pertenecientes al frente de la ZVC de los Andes. Nótese los contenidos anormalmente altos de este elemento en la región de los Nevados de Payachata (NDP; $18^\circ10'\text{S}$) y en el cono monogénético El Rojo Sur ($20^\circ50'\text{S}$).

ELEMENTOS MAYORITARIOS Y TRAZAS

El número de muestras analizadas por centro volcánico (Tabla 1), salvo excepciones (Nevados de Payachata, por ejemplo) es insuficiente para obtener líneas de regresión que permitan estimar los valores geoquímicos «de base» (Hildreth y Moorbath, 1988). Por tal motivo, la discusión de este trabajo se basa en la comparación de muestras con contenidos de SiO_2 igual al 62%, libres de volátiles y normalizadas al 100%.

Sobre la base de nuestros datos y de datos publicados en la literatura (ver referencias marcadas con asterisco), las siguientes características geoquímicas son relevantes a lo largo de la cadena:

1. El contenido de SiO_2 fluctúa entre un 52 y un 78% (Tabla 1, Fig. 2), pero la mayoría de las lavas presentan contenidos que se ubican en el intervalo 58-65%. Las lavas de los escasos conos monogenéticos del área son andesítico-basálticas, en cambio las de los grandes estratovolcanes varían de andesita a riodacita. Las riolitas son comparativamente escasas en el volcanismo cuaternario de esta

región.

2. Para contenidos de SiO_2 iguales al 62%, las rocas ubicadas al norte de la región de los Altos de Pica ($17^\circ\text{--}19^\circ 09'\text{S}$) tienden a ser más ricas en K y Ba (Figs. 3-4), que son elementos litófilos de radio iónico grande (LILE), y en Ti y Zr (Figs. 5-7), que son elementos de alta densidad de carga (HFSE), que las ubicadas al sur de dicha región ($20^\circ 44'\text{--}22^\circ\text{S}$). Un caso extremo de enriquecimiento en estos elementos se observa en algunas rocas de la región de los Nevados de Payachata (18°S ; Wörner *et al.*, 1988; Davidson *et al.*, 1990).

Sobre la base de las características antes mencionadas se definen dos sectores en la ZVC de los Andes, el septentrional o norte, que se extiende entre las latitudes $16^\circ\text{--}19^\circ 09'\text{S}$ y el meridional o sur, ubicado entre $20^\circ 44'$ y 28°S . Ambos sectores están separados por la zona de los Altos de Pica ($19^\circ 09'\text{--}20^\circ 44'\text{S}$), que es un área prácticamente libre de volcanismo cuaternario, con excepción del domo Porquesa, cuya edad es plio-pleistocena.

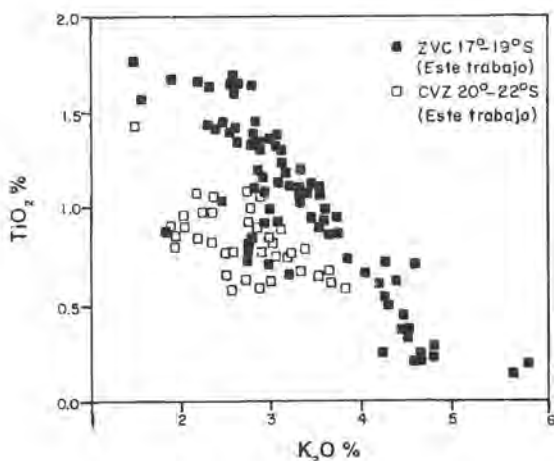


FIG. 5. Diagrama de variación $\text{TiO}_2\text{--K}_2\text{O}$. En él se observa que los centros volcánicos ubicados al norte de la zona de los Altos de Pica tienden a ser también más ricos en Ti que los ubicados al sur de dicha zona.

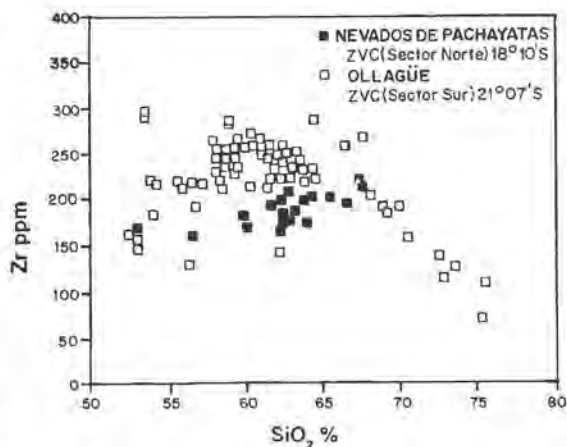


FIG. 6. Diagrama de variación Zr--SiO_2 . En él se puede apreciar que las rocas volcánicas de los Nevados de Payachata, ubicados en el sector norte de la ZVC ($18^\circ 10'\text{S}$), tienden a presentar, para un valor dado de SiO_2 , contenidos más elevados de Zr que las del volcán Ollagüe, ubicado en el sector sur de la ZVC ($21^\circ 18'\text{S}$).

COMPOSICION ISOTOPICA

En el sector septentrional, las razones isotópicas $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ varían entre 0,7065 y 0,7075, pero el intervalo composicional es más amplio en el sector meridional (0,7055-0,7090; Harmon *et al.*, 1984; Tabla 1; Fig. 8).

Las razones isotópicas $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ y $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ son significativamente más bajas en el sector norte que en el sur (Tabla 1; Figs. 9a y 9c). El aumento de estas razones hacia el sur es gradual. Aunque las razones isotópicas $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ de rocas del sur del Perú, son semejantes a aquéllas de las rocas del sector sur de la ZVC, las rocas volcánicas de la

región de los Nevados de Payachata (18°S) presentan razones isotópicas $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ singularmente bajas (Fig. 9c). Las razones isotópicas $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ son, en cambio, semejantes a lo largo de la ZVC (Fig. 9b).

A pesar de estar situado en el sector sur de la ZVC, el centro volcánico monogenético, conocido como El Rojo Sur (20°50'S; 68°37'W), se caracteriza por estar enriquecido en elementos trazas incompatibles (LILE y HFSE; Tabla 1) y presentar razones isotópicas $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ bajas (Fig. 9a), características que son típicas de los productos de los centros volcánicos del sector septentrional.

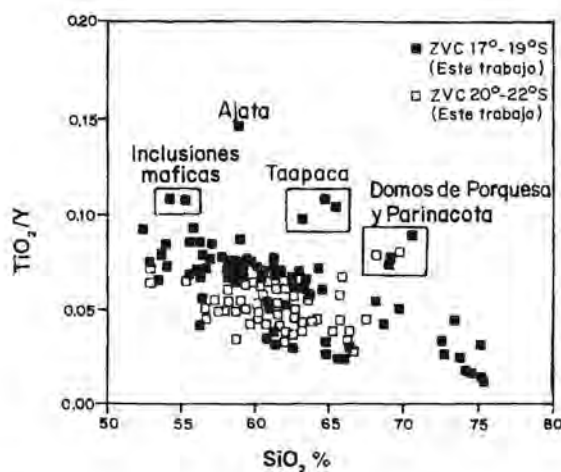


FIG. 7. Diagrama de variación $\text{TiO}_2/\text{Y}-\text{SiO}_2$. En él no sólo se observan diferencias significativas entre los centros ubicados, respectivamente, al norte y sur de la zona de los Altos de Pica, sino que también se puede apreciar la composición de muestras no usuales como son las inclusiones contenidas en flujos andesíticos y domos dacíticos de los volcanes Parinacota, Taapaca y Porquesa.

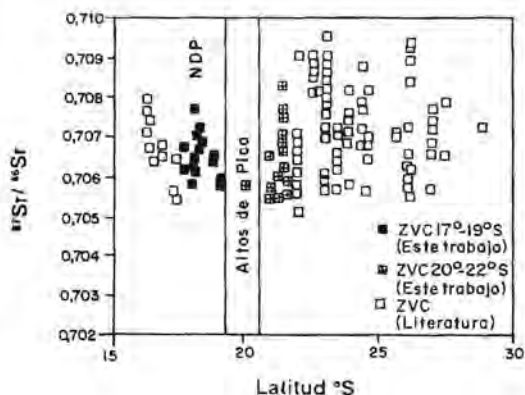


FIG. 8. Comportamiento de la razón isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en rocas pertenecientes al frente de la ZVC de los Andes. Nótese que al norte de la zona de los Altos de Pica, el valor de esta razón es poco variable dentro de un determinado centro volcánico, pero al sur de ella, algunos centros volcánicos presentan una variabilidad alta en el valor de dicha razón.

DISCUSION Y CONCLUSIONES

Los datos geoquímicos, presentados en la Tabla 1 y graficados en las figuras 2-10, permiten visualizar diferencias químicas e isotópicas significativas entre las rocas volcánicas modernas de los sectores norte (16°-19°09'S) y sur (20°44'-28°S) de la ZVC de los

Andes. En efecto, si bien las rocas de ambos sectores tienen razones isotópicas $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ notablemente más elevadas que las de rocas derivadas del manto astenosférico, en el sector norte es común observar que dichas razones permanecen aproximadamente

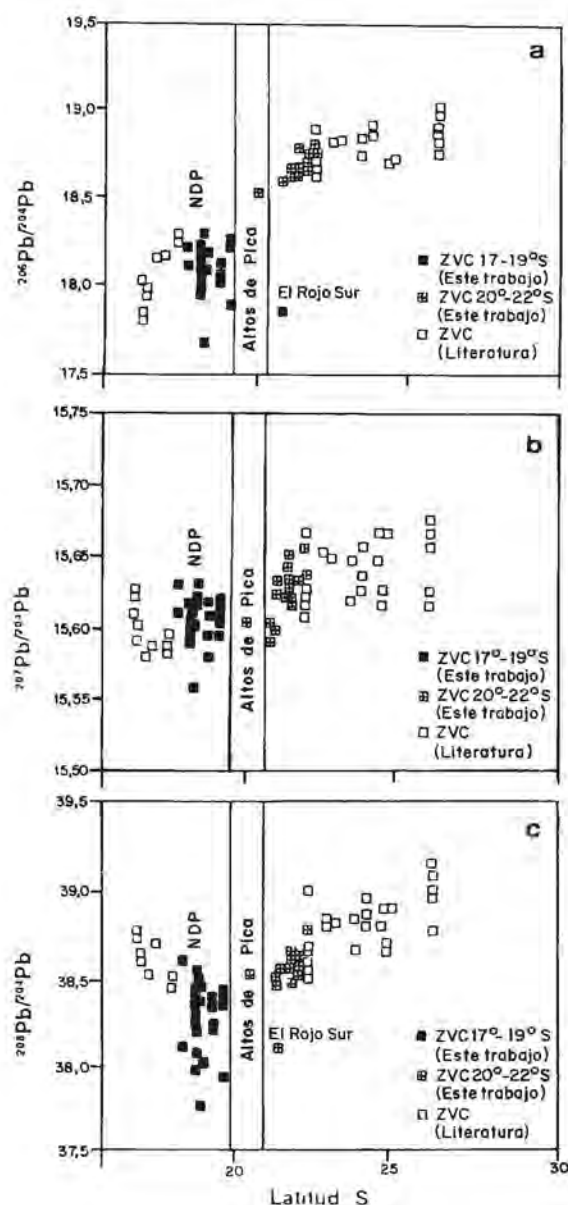


FIG. 9. Conducta de las razones isotópicas $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ y $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ en rocas pertenecientes al frente de la ZVC de los Andes. Nótese las diferencias significativas en el valor de las razones $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ y $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ al norte y sur de la zona de los Altos de Pica.

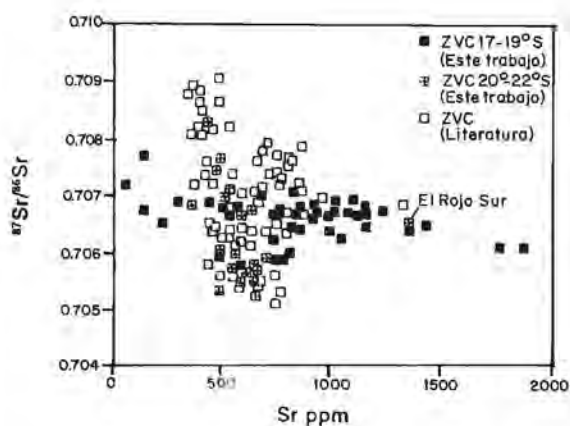


FIG. 10. Diagrama de variación $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Sr. Este diagrama también ilustra las diferencias significativas existentes entre los centros volcánicos ubicados al norte y sur de la zona de los Altos de Pica. Mientras en los primeros existe poca variabilidad en el valor de la razón $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ al cambiar el contenido de Sr, en algunos centros de la zona sur, dicha razón es altamente sensible a las variaciones de este elemento.

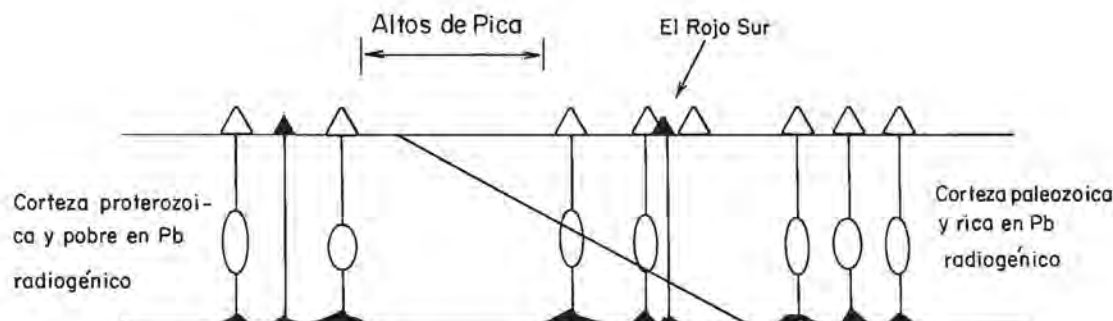


FIG. 11. Ilustración esquemática del modelo de subducción del dominio cortical norte bajo el dominio cortical sur a la altura de la zona de los Altos de Pica y de la ubicación de las zonas de interacción magma-corteza tipo MASH.

constantes al variar el grado de diferenciación (Tabla 1; Fig. 10). En el sector sur, en cambio, sólo en algunos centros volcánicos la razón isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ permanece constante al aumentar el grado de diferenciación; en otros tiende a ser mayor al aumentar el contenido de SiO_2 y disminuir el de Sr.

Las razones isotópicas $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ y $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ de las rocas volcánicas del sector norte de la ZVC son, en general, significativamente más bajas que las de las rocas del sector sur. Los valores extremadamente bajos encontrados en rocas volcánicas de la región de los Nevados de Payachata (Wörner *et al.*, 1988; Fig. 9c) son semejantes a los encontrados en rocas del basamento de Arequipa y esquistos de Belén (Tilton y Barreiro, 1980; Damm y Todt, 1986).

Los sectores norte y sur muestran también diferencias en el comportamiento de algunos elementos mayoritarios y trazas. Por ejemplo, si bien todas las rocas volcánicas modernas de la ZVC de los Andes son ricas en K, las del sector norte superan a las del sector sur no sólo en este elemento, sino que también en Ba, Ti y Zr (Figs. 4-7).

Teniendo en cuenta: a. Que en el sector de la ZVC de los Andes comprendido entre las latitudes $17^{\circ}30'\text{S}$ y $22^{\circ}00'\text{S}$, la zona de subducción, la distancia del frente volcánico a la fosa, la distancia a la zona de Benioff, y el espesor de la corteza se mantienen aproximadamente constantes, y b. Que, en dicho sector, las únicas variables geofísicas de importancia son la edad y composición de la corteza, la cual es proterozoica y con escaso Pb radiogénico en el norte (Arequipa y Belén; Pacci *et al.*, 1980; Tilton y Barreiro, 1980; Damm y Todt, 1986) y paleozoica y más rica en Pb radiogénico en el sur (Bahlburg *et al.*, 1988), se propone que las diferencias geoquímicas, arriba señaladas, reflejan más bien variaciones corticales que variaciones controladas por el manto superior o la zona de subducción.

En este contexto, el modelo que se sugiere difiere del propuesto por Hawkesworth y Ellam (1989) y Rogers y Hawkesworth (1989, 1990), quienes atribuyen al manto litosférico un rol primordial en la génesis de las características geoquímicas presentadas por las rocas de la ZVC de los Andes. En realidad, argumentos de carácter térmico, geoquímico y tectónico permiten cuestionar, por una parte, que el manto litosférico haya sido la fuente principal de los magmas de la ZVC y, por otra, que el potencial contaminante de dicha porción de manto sea elevado (Stern, 1990; Davidson *et al.*, 1990).

El presente modelo se asemeja, más bien, al modelo de MASH (fusión-asimilación-almacenamiento-homogenización) propuesto por Hildreth y Moorbath (1988). Estos autores, sobre la base de un estudio realizado entre las latitudes 33° y $37^{\circ}30'\text{S}$ de la ZVS de los Andes, concluyeron que las variaciones geoquímicas observadas en este sector del arco volcánico de los Andes del Sur son función de las variaciones en el grosor cortical, puesto que la geometría de la zona de subducción, la edad de la corteza oceánica subducida, la naturaleza y abundancia de los sedimentos en la fosa son aproximadamente constantes. Pero, el modelo que se propone difiere del de Hildreth y Moorbath al estimar que las diferencias geoquímicas observadas entre los sectores norte y sur del frente volcánico de la ZVC de los Andes reflejan variaciones en la edad y composición de la corteza y no en el grosor de ella, puesto que este último parámetro se mantiene aproximadamente constante a lo largo de todo frente estudiado.

Las variaciones locales en la composición de los magmas sugieren una evolución de la zona de MASH en respuesta al aumento del espesor cortical (Wörner *et al.*, 1988; Davidson *et al.*, 1990), ocurrida durante el Mioceno inferior a medio (Isacks, 1988). Esta evolución incluiría la desintegración de minerales, como plagioclasa y anfíbola, y/o diversos grados de fusión parcial de la corteza inferior.

La información aportada por las andesitas basálticas de los centros monogenéticos de uno y otro sector permite apreciar el rol de la corteza en la determinación de las características químicas de los magmas del frente volcánico de la ZVC de los Andes. Un caso de interés, al respecto, es el del cono monogenético El Rojo Sur. Este, a pesar de estar ubicado en el sector sur ($20^{\circ}50'\text{S}$; Fig. 1), presenta lavas con razones $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ y $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ tan bajas como las observadas en centros del sector norte (Figs. 8 y 9a). Además, al igual que en dichos centros, El Rojo Sur está enriquecido en elementos incompatibles en comparación con las lavas del sector sur. Suponiendo que es la corteza la que controla las composiciones isotópicas de los magmas del frente volcánico de la ZVC, los sistemas magmáticos pequeños conservarían las características del dominio cortical norte, en cambio los grandes estratovolcanes, mostrarían una incorporación paulatina del dominio cortical sur.

Se estima que los magmas más máficos provienen de niveles más profundos del MASH y sus

características geoquímicas estarían determinadas por procesos llevados a cabo en la base de la corteza. Apparently, ambos ambientes estarían representados en la columna vertical del sector sur, encontrándose el material típico del sector norte en la base de la corteza. Se supone, como se indica en

la figura 11, que en la región de los Altos de Pica, el dominio cortical norte se introduce bajo el dominio cortical sur, acunándose en la base de la corteza. Los magmas de El Rojo Sur provendrían de esta última zona.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado con el aporte Wo-362/1-1 de la Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) otorgado a G.W. Los autores agradecen la hospitalidad y ayuda otorgada por CONAF (I Región) durante el desarrollo del proyecto. L.L-E agradece al DTI-Universidad de Chile la ayuda prestada a través del proyecto E-2834, a la Fundación Andes la beca del Programa de Períodos Sabáticos (1990-1991), que hizo posible su estadía en el NERC Isotope

Geosciences Laboratory, Keyworth, Nottingham, UK y a la Dirección de Investigación de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile por el apoyo económico otorgado durante su estadía en Keyworth. Este trabajo es una contribución al Proyecto IGCP 249, Magmatismo Andino y su Ambiente Tectónico y constituye la contribución N° 58 del NERC Isotope Geosciences Laboratory.

APENDICE 1

MÉTODOS ANALÍTICOS

El contenido de elementos mayoritarios y trazas de las muestras seleccionadas se determinó por fluorescencia de rayos-X en los laboratorios geoquímicos de las Universidades de Bochum y Mainz. El contenido de H_2O fue determinado por titulación, siguiendo el método de Karl Fischer. Los contenidos de Fe^{+2} y Fe^{+3} se obtuvieron por titulación potenciométrica. Las razones isotópicas radiogénicas fueron determinadas por dilución isotópica, seguida por espectrografía de masas, en la Universidad de Oxford. Más detalles sobre las técnicas analíticas se encuentran en Wörner *et al.* (1988).

Con el propósito de evaluar los análisis interlaboratorios, 25 muestras fueron analizadas simultáneamente en los laboratorios de Mainz y Bochum. Los resultados obtenidos en ambos laboratorios son similares, tanto para los elementos mayoritarios como trazas. Sólo en el caso del Nb se observaron diferencias, no sistemáticas, para contenidos inferiores a 20 ppm. Los valores de Nb, obtenidos en Bochum, fueron corregidos empíricamente. Sin embargo, debido a que dichos valores son invariablemente bajos y cercanos al límite de detección, se estimó que eran aceptables dentro de un margen de error de ± 2 ppm. La corrección no afecta a este error en forma sistemática.

TABLA 1. ANALISIS QUIMICOS E ISOTOPICOS DE MUESTRAS DEL VOLCANISMO CUATERNARIO DE LOS ANDES CENTRALES ENTRE LAS LATITUDES 17° y 22°S

VOLCAN TACORA (17°43'S; 69°47'W)									VOLCAN TAAPACA (18°15'S; 69°30'W)						
No. Muestra	TAC-006 Andesita basáltica	TAC-003 Andesita c/anfíbola	TAC-005 Andesita silícea c/anfíbola	TAC-001 Andesita silícea c/anfíbola	TAC-002 Andesita silícea c/anfíbola	TAC-004 Andesita silícea c/anfíbola	TAC-008 Andesita silícea	TAC-007 Dacita	TAP-003 Inclusión	TAP-002 Inclusión	TAP-006 Andesita silícea Bomba	TAP-007 Andesita silícea Lava	TAP-004 Andesita silícea	TAP-005 Dacita Bomba	TAP-001 Dacita Domo
SiO ₂	55,68	59,06	60,15	60,25	60,75	61,25	62,54	63,14	53,39	54,68	62,14	62,14	62,94	64,93	65,03
TiO ₂	1,31	0,90	0,87	0,87	0,92	0,91	0,56	0,60	1,81	1,81	0,71	0,75	0,98	0,72	0,86
Al ₂ O ₃	16,98	17,80	17,73	17,61	17,66	17,30	15,33	17,20	16,70	17,01	17,34	16,90	16,19	16,54	16,35
Fe ₂ O ₃ (T)	7,80	6,45	6,22	6,16	6,05	5,83	5,26	4,64	8,42	8,19	4,87	5,26	5,21	4,07	4,49
MnO	0,11	0,10	0,10	0,09	0,09	0,08	0,09	0,09	0,09	0,09	0,07	0,08	0,07	0,05	0,06
MgO	4,41	2,58	2,73	2,82	2,40	2,44	3,28	1,84	4,27	3,61	2,21	2,41	2,52	1,61	1,86
CaO	7,09	5,94	5,79	5,60	5,51	5,37	4,96	4,54	6,88	6,51	4,97	4,92	4,55	3,86	4,09
Na ₂ O	3,84	4,14	4,03	4,22	4,28	4,28	3,24	4,31	4,23	4,30	2,99	3,33	4,28	4,38	4,38
K ₂ O	2,00	2,14	2,24	2,18	2,37	2,50	3,63	2,71	2,26	2,37	3,51	3,49	2,96	3,26	3,24
P ₂ O ₅	0,41	0,34	0,26	0,27	0,31	0,29	0,16	0,26	0,75	0,74	0,21	0,20	0,34	0,23	0,28
ppc															
TOTAL	99,63	99,45	100,12	100,07	100,34	100,25	99,15	99,33	98,80	99,31	99,02	99,48	100,04	99,65	100,64
Rb	46	48	56	54	61	66	156	81	42	40	119	101	84	89	85
Sr	739	698	633	634	726	686	380	605	1213	1430	593	536	763	786	752
Ba	894	848	906	821	944	1008	738	928	1266	1390	1016	913	1002	1099	1231
Pb															
V	182	115	130	137	127	125	105	70	186	170	102	113	111	79	92
Cr	10	1		4	2	7	103	10	77	45	11	11	65	23	16
Co	31	29	27	31	36	26	39	31	33	27	26	27	29	24	23
Ni	30	2	3	5	6	10	31	1	45	28	7	9	24	9	12
Cu	52	49	22	36	46	49	86	36	45	57	38	44	20	41	31
Zn	96	89	76	85	83	75	64	76	111	113	79	75	72	66	69
Y	19	18	17	17	14	14	19	15	17	17	12	12	10	7	8
Zr	181	170	156	159	175	174	222	199	243	266	157	150	162	158	173
Nb	10	8	7	8	10	10	8	11	14	17	7	6	8	7	8
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0,70625					0,70668				0,7065					0,70668
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd															
²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	18,116					18,223				18,099					
²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	15,613					15,632				15,619					
²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	38,113					38,619				38,399					
δ ¹⁸ O	6,8					7,7				7,4					6,9
Edad (Ma)							0,489								0,082

Nota: La concentración de los óxidos de los elementos mayoritarios está expresada en % en peso y aquélla de los elementos trazas en ppm. Los métodos empleados para obtener estos datos se indican en el Apéndice 1. Los análisis de las muestras de la región de los Nevados de Payachata aparecen en los trabajos de Wörner *et al.* (1988) y Davidson *et al.* (1990).

TABLA 1. Continuación

VOLCAN ARINTICA (18°40'S; 69°00'W)					VOLCAN PUQUINTICA (18°40'S; 69°00'W)						
No. Muestra	SUA-007 Andesita sílicea c/anfíbola	SUA-006 Andesita sílicea c/anfíbola	SUA-008 Andesita sílicea	SUA-013 Riolita	SUP-022 Andesita	SUP-025 Andesita alfrica	SUP-015 Andesita c/clinopi- roxeno	SUP-020 Andesita sílicea c/hornblenda	SUP-021 Andesita sílicea c/hornblenda	SUP-019 Andesita sílicea	SUP-023 Andesita sílicea
SiO ₂	60,75	61,74	62,84	73,88	55,98	55,98	57,67	60,45	60,45	60,55	63,93
TiO ₂	1,13	0,86	0,85	0,24	1,50	1,45	1,32	0,97	0,97	0,92	0,78
Al ₂ O ₃	16,21	16,47	16,81	14,18	17,12	17,32	16,27	17,22	17,23	17,12	16,51
Fe ₂ O ₃ (T)	5,89	5,64	5,58	1,38	8,18	7,88	7,25	6,26	6,23	6,00	4,52
MnO	0,08	0,10	0,09	0,07	0,11	0,10	0,09	0,10	0,10	0,10	0,08
MgO	2,56	2,25	1,97	0,39	3,40	3,64	3,81	2,45	2,39	2,24	1,77
CaO	4,85	4,81	4,64	1,15	6,74	6,42	5,96	5,35	5,40	5,30	3,85
Na ₂ O	4,47	4,07	4,22	4,53	3,93	4,33	4,01	4,29	4,36	4,15	4,29
K ₂ O	3,44	2,90	3,08	4,24	1,96	2,36	2,87	2,74	2,74	2,76	3,35
P ₂ O ₅	0,44	0,35	0,38	0,04	0,59	0,53	0,46	0,46	0,46	0,44	0,28
ppc											
TOTAL	99,82	99,19	100,46	100,10	99,51	100,01	99,71	100,29	100,33	99,58	99,36
Rb	79	78	81	112	39	42	67	64	65	65	81
Sr	1113	815	868	225	918	1207	1054	1146	1164	1130	858
Ba	1497	1192	1265	1276	1003	1332	1271	1423	1397	1357	1509
Pb											
V	102	94	84	8	194	164	148	107	112	102	68
Cr	54	16	5	2	4		89	5	5		16
Co	31	27	30	60	35	40	34	29	31	29	27
Ni	18	4			11	16	33	3	5		8
Cu	37	29	25	4	30	41	47	18	21	22	23
Zn	95	80	75	42	126	87	92	86	85	82	76
Y	15	18	15	10	27	17	17	15	17	17	13
Zr	274	203	206	178	195	203	227	207	205	207	262
Nb	13	13	12	14	13	13	13	14	13	13	14
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr		0,70644		0,70654	0,70659			0,70648			0,70643
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd											
²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb		18,132		18,135	18,134			18,019			18,057
²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb		16,612		15,621	16,621			15,597			15,581
²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb		38,394		38,401	38,365			38,247			38,226
¹⁸ O		7,4		7,4	6,5	6,9		6,5			7,4
Edad (Ma)		0,637				0,486					

TABLA 1. Continuación

VOLCAN ISLUGA (19°09'S; 58°50'W)																	
UNIDAD-1					UNIDAD-2		UNIDAD-3										UNIDAD-4
No. Muestra	IS1-005 Andesita c/clinopiroxeno +hornblenda	IS1-016 Andesita c/pxoxeno	IS1-006 Andesita c/clinopiroxeno	IS1-022 Andesita vítrea	IS2-018 Andesita silícea	IS2-012 Andesita silícea Lava	IS3-042 Andesita Pómez	IS3-010 Andesita silícea	IS3-026 Andesita silícea	IS3-035 Andesita silícea	IS3-025 Andesita silícea	IS3-029 Andesita silícea	IS3-030 Andesita silícea	IS3-046 Andesita silícea	IS3-045 Andesita silícea c/pxoxeno	ISX-099 Dacita	
SiO ₂	58,36	60,55	62,64	64,53	60,35	60,75	59,16	60,05	60,45	60,45	60,55	60,75	60,85	60,95	62,24	64,63	
TiO ₂	1,32	1,07	0,94	0,71	1,09	1,06	1,18	1,09	1,05	1,06	1,07	0,91	0,90	1,13	0,99	0,71	
Al ₂ O ₃	16,83	17,09	16,26	15,74	17,05	16,85	16,65	17,06	16,94	16,72	17,12	17,42	17,97	16,36	16,49	15,67	
Fe ₂ O ₃ (T)	7,35	6,43	5,69	4,65	6,60	6,48	7,00	6,61	6,37	6,54	6,42	5,88	5,87	6,39	5,85	4,71	
MnO	0,10	0,10	0,09	0,07	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,09	0,09	0,07	
MgO	3,19	2,37	2,15	1,99	2,42	2,37	2,97	2,39	2,31	2,70	2,35	2,08	1,99	2,78	2,23	1,96	
CaO	5,97	5,41	4,66	3,94	5,55	5,35	5,58	5,48	5,47	5,35	5,26	5,13	5,25	5,33	4,76	3,98	
Na ₂ O	3,95	4,26	3,75	3,51	3,96	4,41	3,90	3,94	4,06	3,73	4,00	4,12	4,33	4,08	3,90	3,18	
K ₂ O	2,61	2,90	3,44	4,22	2,78	2,91	2,81	2,82	2,89	2,87	2,93	2,91	2,88	3,09	3,32	4,57	
P ₂ O ₅	0,41	0,40	0,35	0,20	0,42	0,41	0,39	0,42	0,41	0,38	0,40	0,43	0,41	0,37	0,35	0,20	
ppc																	
TOTAL	100,09	100,58	99,97	99,56	100,32	100,69	99,74	99,96	100,05	99,90	100,2	99,73	100,55	100,57	100,22	99,68	
Rb	80	93	117	166	88	92	90	90	96	91	94	96	82	102	111	167	
Sr	712	733	632	494	744	731	706	738	717	659	714	779	766	812	679	504	
Ba	874	982	1031	939	1058	1081	991	1054	998	922	965	1088	1096	933	1074	1007	
Pb																	
V	160	112	97	85	116	126	134	115	110	122	111	86	80	126	107	90	
Cr	9	5	5	23	4	5	14	7	1	12	6	1	1	28	5	12	
Co	34	34	27	37	27	36	36	31	31	34	35	29	27	28	32	32	
Ni	8		4	8		1	10	1	1	8		1		10	6	12	
Cu	33	13	18	30	11	32	22	11	9	17	10	87	14	26	26	35	
Zn	95	92	72	64	89	88	81	88	90	78	97	130	80	82	78	64	
Y	18	18	19	27	17	18	19	18	17	18	15	18	19	17	18	22	
Zr	214	221	233	222	219	219	226	220	223	191	221	219	226	212	225	229	
Nb	13	14	13	11	13	13	14	13	13	13	13	13	14	14	14	12	
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr				0,70593		0,70585			0,70589			0,70589	0,70590	0,70600			
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd																	
²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb				18,264		17,888			18,248			18,243	18,228	18,255			
²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb				15,615		15,597			15,610			15,617	15,604	15,622			
²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb				38,439		37,946			38,366			38,410	38,369	38,434			
δ ¹⁸ O			7,2	8,0		7,3			10,0			6,6		6,7			
Edad(Ma)															0,096		

TABLA 1. Continuación

VOLCAN OLCA (20°56'S; 68°30'W)							VOLCAN MIÑO (21°11'S; 68°35'W)				VOLCAN AUCANQUILCHA (21°13'S; 68°28'W)			
No. Muestra	OLC-006 Andesita	OLC-007 Andesita silícea c/clinopi- roxeno+ anfíbola	OLC-001 Andesita silícea Lava	OLC-003 Andesita silícea Lava	OLC-005 Andesita silícea c/anfíbola	OLC-004 Dacita c/piroxeno +anfíbola	MIN-004 Andesita	MIN-007 Andesita c/anfíbola	MIN-008 Andesita c/piroxeno + anfíbola	MIN-002 Andesita silícea	AUC-004 Andesita silícea Lava	AUC-003 Dacita c/biotita +hornblenda	AUC-001 Dacita Lava	AUC-007 Dacita
SiO ₂	59,10	60,61	60,92	61,39	62,27	63,46	57,26	58,96	59,77	61,78	62,73	63,24	64,58	65,25
TiO ₂	1,04	0,84	0,84	0,80	0,74	0,66	0,85	0,83	0,82	0,64	0,59	0,85	0,62	0,60
Al ₂ O ₃	16,99	17,13	17,63	17,36	16,92	16,69	17,32	17,50	17,83	16,89	17,62	16,24	16,10	16,43
Fe ₂ O ₃ (T)	7,06	5,19	5,85	5,64	5,41	4,66	6,87	6,35	6,40	5,25	3,90	5,53	3,90	3,90
MnO	0,09	0,10	0,08	0,08	0,08	0,07	0,10	0,09	0,10	0,08	0,07	0,08	0,07	0,06
MgO	3,73	2,39	2,59	2,25	2,44	1,98	3,78	3,47	3,22	2,78	1,53	2,47	1,87	1,61
CaO	5,97	5,40	5,07	4,96	4,83	4,15	6,53	6,14	6,09	4,98	4,90	4,73	3,83	3,86
Na ₂ O	4,11	4,15	4,05	4,48	4,39	4,39	3,83	4,08	4,44	4,05	4,53	4,17	4,37	4,63
K ₂ O	2,47	2,76	2,97	2,74	2,73	3,17	2,19	2,37	1,96	2,69	2,52	3,16	2,94	2,81
P ₂ O ₅	0,27	0,28	0,22	0,24	0,20	0,20	0,24	0,23	0,24	0,20	0,19	0,25	0,18	0,17
ppc	0,19	0,51	0,69	0,76	0,80	0,97	2,43	0,98	0,21	1,06	0,81	0,23	1,56	0,98
TOTAL	101,02	100,36	100,91	100,70	100,81	100,40	101,40	101,00	101,08	100,40	99,39	100,95	100,02	100,30
Rb	71	95	90	93	100	110	49	47	48	62	76	97	83	76
Sr	654	667	621	692	585	654	662	684	700	596	684	605	567	588
Ba	796	825	892	863	801	976	705	756	774	794	929	919	1030	977
Pb			15	13	14	16	11	11	10	11	12	11	13	13
V	136	90	103	89	89	87	124	129	141	94	103	113	72	76
Cr	62	11	21	14	17	17	53	54	57	55	19	45	31	20
Co	18	12	20	27	10	40	33	35	52	12	11	54	20	42
Ni	18	7	12	7	10	8	20	19	21	18	17	14	10	8
Cu	51	31	47	31	42	48	50	48	60	44	112	45	36	46
Zn	94	71	74	79	69	71	77	79	79	74	66	79	69	80
Y	21	20	22	15	17	15	17	15	16	13	14	18	11	9
Zr	189	187	208	176	162	174	146	141	145	140	155	178	158	139
Nb	10	10	10	10	9	9	7	8	7	7	6	10	8	7
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0,70580	0,70573	0,70565	0,70561	0,70547	0,70547	0,70576			0,70550			0,70604	
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd										18,650			18,678	
²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	18,676	18,632			18,632					15,623			15,624	
²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	15,636	15,626			15,606					38,591			38,566	
²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	38,559	38,528			38,504					7,3				
δ ¹⁸ O		6,3												
Edad (Ma)														

VOLCAN OLLAGÜE (21°18'S; 68°11'W)																		
No. Muestra	OLA-032 Inclusión	OLA-014 Inclusión	OLA-023 Andesita silícea Lava	OLA-003 Andesita silícea Bomba	OLA-029 Andesita silícea	OLA-025 Andesita silícea c/biotita+ hornblenda	OLA-021 Andesita silícea	OLA-013 Andesita silícea	OLA-001 Andesita silícea Bomba	OLA-017 Andesita silícea	OLA-026 Dacita	OLA-024 Dacita c/piroxeno	OLA-019 Dacita Bloque	OLA-011 Dacita Lava	OLA-031 Dacita Domo	OLA-016 Dacita Lava	OLA-010 Riodacita Domo	OLA-033 Riodacita Domo
SiO ₂	53,09	56,38	60,41	61,57	61,65	62,08	62,12	62,15	62,41	62,70	63,23	63,37	63,46	63,79	64,69	65,57	66,19	66,38
TiO ₂	1,42	1,07	0,94	0,85	1,01	0,82	0,89	0,81	0,76	0,76	0,78	0,77	0,75	0,77	0,66	0,61	0,57	0,57
Al ₂ O ₃	17,27	17,39	16,93	16,00	16,66	16,53	16,75	16,69	16,82	16,29	16,34	16,57	16,19	16,28	16,20	15,78	15,55	15,68
Fe ₂ O ₃ (T)	9,26	8,05	6,35	5,19	6,10	5,48	5,43	5,47	5,20	5,39	4,90	5,09	4,79	4,89	4,33	4,01	3,61	3,67
MnO	0,11	0,10	0,09	0,07	0,08	0,08	0,07	0,08	0,07	0,08	0,07	0,06	0,06	0,07	0,06	0,06	0,05	0,05
MgO	5,19	3,90	3,57	2,19	2,81	2,66	2,37	2,37	2,17	2,64	2,17	2,09	2,10	2,09	1,77	1,53	1,20	1,21
CaO	8,71	6,77	5,87	5,37	5,13	4,87	4,89	4,75	4,68	4,67	4,37	4,36	4,22	4,19	3,68	3,34	3,02	3,04
Na ₂ O	3,52	3,71	3,52	3,97	3,85	3,73	3,99	4,12	4,11	3,75	3,71	4,13	3,96	4,04	4,00	4,12	4,08	4,08
K ₂ O	1,46	2,15	2,75	2,90	2,78	2,98	3,11	2,89	2,88	3,04	3,34	3,19	3,14	3,19	3,57	3,62	3,72	3,77
P ₂ O ₅	0,27	0,28	0,22	0,22	0,26	0,21	0,24	0,24	0,22	0,20	0,20	0,18	0,21	0,21	0,19	0,18	0,16	0,17
ppc	1,43	0,54	0,66	1,08	0,15	0,86	0,99	0,49	0,78	0,92	1,46	0,58	1,53	0,69	0,92	1,05	1,48	1,34
TOTAL	101,73	100,34	101,32	99,41	100,48	100,30	100,85	100,06	100,10	100,44	100,57	100,39	100,41	100,21	100,07	99,87	99,63	99,96
Rb	45	55	83	75	82	107	93	93	94	101	125	104	104	104	116	125	122	123
Sr	641	603	479	487	498	443	535	515	507	471	418	524	483	486	460	436	420	424
Ba	809	710	776	1040	956	827	948	858	835	890	876	949	940	940	958	931	1102	1106
Pb																		18
V	155	160	133	92	120	102	100	97	89	90	85	97	78	78	65	57	51	53
Cr	69	72	87	28	41	44	28	31	26	41	26	32	28	25	25	19	9	14
Co	26	28	53	33	36	28	22	9	9	9	18	44	9	9	14	20	7	17
Ni	15	14	11	7	6	8	5	8	7	10	6	5	10	10	7	6	6	4
Cu	13	20	13	13	13	13	16	10	16	14	16	17	11	10	9	10	10	9
Zn	123	95	95	93	101	82	94	82	80	85	76	79	86	85	84	79	85	83
Y	20	21	20	17	21	19	20	18	17	19	18	14	17	17	17	16	13	13
Zr	188	159	166	206	189	175	198	179	171	184	173	197	201	201	200	196	210	219
Nb	10	7	10	11	12	11	8	10	11	11	11	12	13	13	13	13	13	13
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0,70713	0,70669	0,70742	0,70733	0,70776	0,70774	0,70732	0,70691	0,70706	0,70744	0,70810	0,70746	0,70764	0,70766	0,70778	0,70795	0,70830	0,70832
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd																		
²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb								18,776	18,767	18,775			18,786	18,780			18,786	
²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb								15,646	15,632	15,650			15,642	15,637			15,654	
²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb								38,657	38,613	38,656			38,623	38,620			38,622	
¹⁸ O/ ¹⁶ O									7,2								8,0	
Edad (Ma)																		

VOLCAN PORUÑITA (21°19'S; 68°34'W)			CERRO CHELA (21°24'S; 68°30'W)			CERRO PALPANA (21°33'S; 68°32'W)					CERRO LAS CUEVAS (21°35'S; 68°29'W)	
No. Muestra	PORU-002 Andesita silícea	PORU-003 Xenolito	CHE-008 Andesita Brecha	CHE-007 Andesita Lava	CHE-006 Pómez en Ignimbrita	PAL-005 Andesita Bomba	PAL-001 Andesita o'clinopi- roxeno Lava	PAL-008 Andesita	PAL-004 Andesita microfítica	PAL-006 Andesita microfítica	CUE-001 Andesita Basáltica	CUE-004 Andesita o'olivino 'spalter cone'
SiO ₂	60,52	74,09	57,08	59,96	71,80	57,06	58,03	58,06	58,07	59,27	52,95	59,74
TiO ₂	1,05	0,13	0,88	0,77	0,19	0,88	0,91	0,86	0,98	0,99	1,42	0,96
Al ₂ O ₃	17,28	14,05	16,97	18,14	13,71	18,83	17,45	17,57	17,81	18,87	17,15	16,92
Fe ₂ O ₃ (T)	6,38	0,91	7,38	6,25	1,03	6,75	6,96	7,04	6,94	6,14	9,24	6,57
MnO	0,08	0,04	0,10	0,10	0,06	0,09	0,09	0,09	0,09	0,08	0,11	0,09
MgO	3,33	0,19	4,67	2,31	0,25	2,61	3,63	3,75	2,99	2,14	5,18	3,83
CaO	5,77	0,98	6,96	5,58	0,70	6,39	6,47	6,63	6,19	5,83	8,73	5,90
Na ₂ O	4,30	4,52	3,80	4,02	4,31	4,37	4,14	4,28	4,25	4,67	3,57	4,41
K ₂ O	2,38	4,35	1,84	2,92	4,64	1,88	2,02	1,94	2,22	2,35	1,50	2,06
P ₂ O ₅	0,25	0,05	0,24	0,26	0,05	0,27	0,24	0,22	0,27	0,27	0,27	0,26
ppc		0,25	0,10	0,83	2,65	0,74	0,34	0,05	0,39	0,61	0,01	
TOTAL	101,34	99,56	100,02	101,14	99,39	99,87	100,28	100,49	100,20	101,22	100,13	100,74
Pb	49	129	38	56	124	39	49	49	50	51	28	42
Sr	609	158	616	605	90	696	635	652	652	680	796	711
Ba	961	1141	634	837	1048	693	697	668	730	800	386	728
Pb												
V	128	7	143	109	12	131	129	130	149	139	250	142
Cr	56	4	93	8	6	13	71	45	32	9	75	113
Co	16	63	22	46	3	44	36	33	18	49	51	20
Ni	20	2	37	3	3	11	23	26	23	9	30	37
Cu	30	1	82	41	8	89	52	74	60	69	48	54
Zn	113	30	90	86	31	99	86	77	98	94	115	101
Y	17	11	16	18	10	18	15	17	18	18	22	15
Zr	180	97	133	164	124	144	146	131	171	176	104	158
Nb	11	14	5	8	12	8	7	8	8	9	7	7
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0,70671		0,70562		0,70580	0,70541			0,70555	0,70565	0,70559	0,70592
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd												
²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	18,671		18,689						18,660		18,699	
²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	15,637		15,623						15,619		15,637	
²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	38,478	</										

TABLA 1. Continuación

CERRO CEBOLLAR (21°37'S; 68°28'W)			DOMO CHANCA (21°46'S; 68°18'W)			VOLCAN AZUFRE (21°47'S; 68°14'W)		VOLCAN PORUÑA (21°53'S; 68°30'W)
No. Muestras	CEB-005 Andesita silícea Lava	CEB-004 Andesita silícea Lava	CHA-004 Andesita silícea Brecha	CHA-003 Dacita Brecha	CHA-001 Dacita	AZU-002 Inclusión	AZU-001 Andesita Silícea Lava	SP-001 Andesita Lava
SiO ₂	61,57	61,76	61,68	65,24	66,16	60,05	61,59	56,42
TiO ₂	0,68	0,66	0,77	0,52	0,52	0,85	0,76	0,87
Al ₂ O ₃	17,36	17,74	16,50	16,07	15,78	16,19	16,47	16,53
Fe ₂ O ₃ (T)	5,57	5,57	3,68	3,82	3,77	6,16	5,56	7,40
MnO	0,09	0,07	0,08	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10
MgO	2,20	1,94	3,05	1,60	1,71	3,81	3,05	5,69
CaO	5,00	5,07	5,30	3,57	3,48	6,17	5,26	6,98
Na ₂ O	4,19	4,28	3,60	3,98	3,64	3,26	3,64	3,64
K ₂ O	2,75	2,54	2,83	3,56	3,84	2,33	2,74	1,71
P ₂ O ₅	0,19	0,20	0,19	0,15	0,12	0,21	0,18	0,22
ppc	0,87	0,91	0,85	1,13	0,97	1,58	0,74	0,61
TOTAL	100,47	100,64	98,53	99,70	100,06	100,69	100,08	100,17
Rb	86	84	188	138	183	71	105	37
Sr	549	563	367	493	357	573	492	578
Ba	777	792	667	903	697	701	647	593
Pb								
V	95	110	68	71	69	138	118	169
Cr	14	12	20	11	26	84	50	206
Co	13	48	32	9	7	24	23	25
Ni11	10	2	6	7	9	22	13	60
Cu	22	25	13	25	15	28	19	33
Zn	67	67	57	62	58	86	78	83
Y	17	20	18	15	19	19	20	19
Zr	145	149	144	162	149	146	163	134
Nb	8	7	14	9	13	9	11	9
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0,70575			0,70608	0,70686			0,70663
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd								
²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	18,753			18,724	18,793			18,737
²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	15,636			15,624	15,659			15,638
²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	38,644			38,657	38,775			38,674
δ ¹⁸ O								
Edad (Ma)								

REFERENCIAS

- Bahlburg, H.; Breitzkreuz, C.; Gies, P. 1988. The southern Central Andes. Contributions to structure and evolution of an active continental margin. In *Lecture Notes in Earth Sciences* No. 17. Springer Verlag Heidelberg, 261 p. Berlin.
- Baker, M.C.W.; Francis, P.W. 1978. Upper Cenozoic volcanism in the Central Andes: Ages and volumes. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 41, p. 175-187.
- Barreiro, B.A. Clark, A.H. 1984. Lead isotopic evidence for evolutionary changes in magma-crust interaction, central Andes, southern Peru. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 69, No. 1, p. 30-42. (*)
- Benjamin, M.T.; Johnson, N.M.; Naeser, C.W. 1987. Recent rapid uplift in the Bolivian Andes: Evidence from fission-track dating. *Geology*, Vol. 15, p. 680-683.
- Damm, K.W.; Todt, W. 1986. Geochemie, Petrologie und Geochronologie der Plutonite und des metamorphen Grundgebirges in Nordchile. In *Forschungsberichte aus den zentralen Anden (21°-25°S) und aus dem Atlas-system (Marokko) 1981-1985*. Forschungsgruppe: Mobilität aktiver Kontinentalränder (Giese, P.), *Berliner Geowissenschaftliche Abhandlungen, Reihe A: Geologie und Palaeontologie*, Vol. 66, No. 1, p. 73-146.
- Davidson, J.P.; McMillan, N.J.; Moorbath, S.; Wörner, G.; Harmon, R.S.; López-Escobar, L. 1990. The Nevados de Payachata volcanic region (18°S/69°W, N. Chile). 2. Evidence for widespread crustal involvement in Andean Magmatism. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, Vol. 105, p. 412-432.
- De Silva, S.L. 1989. Altiplano-Puna complex of the Central Andes. *Geology*, Vol. 17, p. 1102-1106.
- Déruelle, B. 1982. Petrology of the Plio-Quaternary volcanism of the South-Central and Meridional Andes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 14, p. 77-124. (*)
- Fernández, A.; Hörmann, P.K.; Kussmaul, S.; Meave, J.; Pichler, H.; Subieta, T. 1973. First Petrologic Data on Young Volcanic Rocks of SW-Bolivia: *Tschermaks Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, Vol. 19, No. 3, p. 149-172. (*)
- Francis, P.W.; Moorbath, S.; Thorpe, R.S. 1977. Sr-isotope data for recent andesites in Ecuador and North Chile. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 37, p. 197-202. (*)
- Francis, P.W.; Roobol, M.J.; Walker, G.P.L.; Cobbold, R.R.; Coward, M. 1974. The San Pedro and San Pablo volcanoes of northern Chile and their hot avalanche deposits. *Geologische Rundschau*, Vol. 63, p. 357-388. (*)
- Francis, P.W.; Rundle, C.C. 1976. Rates of production of the main magma types in the Central Andes. *Geological Society of America, Bulletin*, Vol. 87, p. 474-480.
- Francis, P.W.; Thorpe, R.S.; Moorbath, S.; Kretschmar, G.A.; Hammill, M. 1980. Strontium isotope evidence for crustal contamination of calc-alkaline volcanic rocks from Cerro Galán, NW-Argentina. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 48, p. 257-267. (*)
- Francis, P.W.; Wells, G.L. 1988. Landsat thematic mapper observations of debris avalanche deposits in the Central Andes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 50, p. 258-278.
- Frey, F.A.; Gerlach, D.C.; Hickey, R.L.; López-Escobar, L.; Munizaga, F. 1984. Petrogenesis of the Laguna del Maule volcanic complex, Chile (36°S). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, Vol. 88, p. 133-149. (*)
- Harmon, R.S.; Barreiro, B.A.; Moorbath, S.; Hoefs, H.; Francis, P.W.; Thorpe, R.S.; Déruelle, B.; McHugh, J.; Viglino, J.A. 1984. Regional O-, Sr- and Pb-isotope relationships in late Cenozoic calc-alkaline lavas of the Andean Cordillera. *Journal of the Geological Society of London*, Vol. 141, p. 803-822.
- Harmon, R.S.; Barreiro, B.A.; Moorbath, S.; Hoefs, H.; Francis, P.W.; Thorpe, R.S.; Déruelle, B.; McHugh, J.; Viglino, J.A. 1984. Regional O-, Sr- and Pb-isotope relationships in late Cenozoic calc-alkaline lavas of the Andean Cordillera. *Journal of the Geological Society of London*, Vol. 141, p. 803-822. (*)
- Hawkesworth, C.J.; Ellam, R.M. 1989. Chemical fluxes and wedge replenishment rates along recent destructive plate margins. *Geology*, Vol. 17, p. 46-49.
- Hawkesworth, C.J.; Hammill, M.; Gledhill, A.R.; van Calsteren, P.; Rogers, G. 1982. Isotope and trace element evidence for late stage intracrustal melting in the High Andes. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 58, p. 240-254. (*)
- Hawkesworth, C.J.; Norry, M.J.; Roddick, J.C.; Baker, P.E.; Francis, P.W.; Thorpe, R.S. 1979. ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd, ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr, and incompatible element variations in calc-alkaline andesites and plateau lavas from S-America. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 42, p. 45-57. (*)
- Hildreth, W.E.; Moorbath, S. 1988. Crustal contribution to arc magmatism in the Andes of Central Chile. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, Vol. 98, p. 455-489.
- Horn, S. 1991. Intra- und intervulkanische Variationen entlang der Zentralen Vulkanzone in Nordchile (17-22°S): Petrographische und geochemische Untersuchungen. M.Sc. Thesis (Unpublished). *Universität Mainz*, 144 p.
- Hörmann, P.K.; Pichler, H.P.; Zeil, W. 1973. New data on the young volcanism in the Puna of NW-Argentina. *Geologische Rundschau*, Vol. 62, p. 397-418. (*)
- Isacks, B.L. 1988. Uplift of the Central Andean Plateau and bending of the Bolivian Orocline. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 93, p. 3211-3231.

(*) Referencias cuyos datos se emplearon en la elaboración de las figuras.

- James, D.E. 1971a. Plate tectonic model for the evolution of the Central Andes. *Geological Society of America, Bulletin*, Vol. 82, p. 3325-3346.
- James, D.E. 1971b. Andean crustal and upper mantle structure. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 76, p. 3246-3271.
- 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 and Planetary Science Letters*, Vol. 57, No. 1, p. 47-62. (*)
- James, D.E.; Brooks, C.; Cuyubamba, A. 1976. Andean Cenozoic volcanism: Magma genesis in the light of Sr isotopic composition and trace element geochemistry. *Geological Society of America, Bulletin*, Vol. 87, p. 592-600. (*)
- Katsui, Y.; González-Ferrán, O. 1968. Geología del área neovolcánica de los Nevados de Payachata. *Universidad de Chile, Departamento de Geología, Publicaciones*, No. 29, p. 1-61. (*)
- Klerkx, J.; Deutsch, S.; Pichler, H.; Zeil, W. 1977. Strontium isotopic composition and trace element data bearing on the origin of Cenozoic volcanic rocks of the Central and Southern Andes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 2, p. 49-71. (*)
- Kussmaul, S.; Hömann, P.K.; Ploskonka, E.; Subieta, T. 1977. Volcanism and structure of SW-Bolivia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 2, p. 73-111. (*)
- Lahsen, A. 1982. Upper Cenozoic volcanism and tectonism in the Andean of northern Chile. *Earth Science Reviews*, Vol. 18, p. 285-302.
- Moorbath, S.; Thorpe, R.S.; Francis, P.W. 1979. Rare earth and Sr-isotope evidence concerning the petrogenesis of north Chilean ignimbrites. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 42, p. 359-367. (*)
- O'Callaghan, L.J.; Francis, P.W. 1986. Volcanological and petrological evolution of San Pedro volcano, Provincia El Loa, North Chile. *Journal of Geological Society of London*, Vol. 143, p. 275-286. (*)
- Pacci, D.; Hervé, F.; Cordani, H.; Munizaga, F.; Kawashita, K. 1980. Acerca de la edad Rb-Sr Precámbrica de la Formación Esquistos de Belén, Departamento de Parinacota, Chile. *Revista Geológica de Chile*, No. 11, p. 43-59.
- Palacios, C.; López-Escobar, L. 1979. Geoquímica y petrología de andesitas cuaternarias de los Andes Centrales (18°57'-19°28'S). In *Congreso Geológico Chileno*, No. 2, Actas, Vol. 3, p. E73-E88. (*)
- Peccerillo, A.; Taylor, S.R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from Kastamonu area, northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, Vol. 58, p. 63-81. (*)
- Pichler, H.; Zeil, W. 1972. Paleozoic and Mesozoic ignimbrites of northern Chile. *Neues Jahrbuch für Mineralogie. Abhandlungen*, Vol. 116, p. 196-207. (*)
- Rogers, G.R.; Hawkesworth, C.J. 1989. A geochemical traverse across the north Chilean Andes. Evidence for crust generation from the mantle wedge. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 91, p. 271-285.
- Rogers, G.; Hawkesworth, C.J. 1990. Reply to comment by C.R. Stern on «A geochemical traverse across the north Chilean Andes. Evidence for crust generation from the mantle wedge». *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 101, p. 134-137.
- Schwarz, G.; Martínez, E.; Bannister, J. 1986. Untersuchungen zur elektrischen Leitfähigkeit in den zentralen Anden (21°-25°S) und aus dem Atlas-System (Marokko), Teil 1 (Giese, P.; editor). *Berliner Geowissenschaftliche Abhandlungen, Reihe A: Geologie und Paläontologie*, Vol. 66, No. 1, p. 49-72.
- Siegers, A.; Pichler, H.; Zeil, W. 1969. Trace element abundances in the andesite formation of northern Chile. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 33, p. 882-887. (*)
- Stern, C.R. 1990. Comment on «A geochemical traverse across the north Chilean Andes. Evidence for crust generation from the mantle wedge» by G. Rogers and C.J. Hawkesworth. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 101, p. 129-133.
- Thornburg, T.M.; Kulm, L.D. 1987. Sedimentation in the Chile trench: Depositional morphologies, lithofacies, and stratigraphy. *Geological Society of America, Bulletin*, Vol. 98, p. 33-52.
- Thorpe, R.S.; Francis, P.W. 1979. Variations in Andean andesite compositions and their petrogenetic significance. *Tectonophysics*, Vol. 57, p. 53-70. (*)
- Thorpe, R.S.; Francis, P.W.; O'Callaghan, L. 1984. Relative roles of source composition, fractional crystallization, and crustal contamination in the petrogenesis of Andean volcanic rocks. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol. 310, p. 675-692. (*)
- Thorpe, R.S.; Potts, P.J.; Francis, P.W. 1976. Rare earth data and petrogenesis of andesite from the north Chilean Andes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, Vol. 54, p. 65-78. (*)
- Tilton, G.R.; Barreiro, B.A. 1980. Origin of lead in Andean calc-alkaline lavas, southern Perú. *Science*, Vol. 210, No. 4475, p. 1245-1247. (*)
- Wörner, G.; Harmon, R. S.; Davidson, J. P.; Moorbath, S.; Turner, D.L.; McMillan, N. J.; Nye, C.; López-Escobar, L. 1988. The Nevados de Payachata volcanic region (18°S/69°W, N. Chile). 1. Geological, geochemical, and isotopic observations. *Bulletin of Volcanology*, Vol. 50, p. 287-303.