

Caracterización litogeoquímica y análisis correlacional de los intrusivos de las superunidades de Yarabamba y Challaviento en el sur del Perú

LITHOGEOCHEMICAL CHARACTERIZATION AND CORRELATIONAL ANALYSIS OF INTRUSIVE ROCKS OF YARABAMBA AND CHALLAVIENTO SUPER UNITS IN SOUTHERN PERU

Hugo Rivera¹, Jorge Chira¹, Néstor Chacón¹, Giovanni Pedemonte², Rosella Mendoza²

RECIBIDO: 19/06/2013—APROBADO: 12/08/2013

RESUMEN

Las rocas intrusivas constituyentes de las Superunidades de Yarabamba y Challaviento en el sur del Perú, de acuerdo a su composición de elementos mayores, menores y trazas y su graficación en los diversos diagramas geoquímicos nos muestran que ambas Superunidades presentan un grado de evolución por cristalización fraccionada, son de naturaleza subalcalina y de la serie calcoalcalino de alto K.

Las rocas de ambas Superunidades son de naturaleza metaluminosas. Los contenidos de Sr y Rb nos indican una fuerte asimilación y diferenciación de los magmas. El enriquecimiento de los elementos LILE (<100) y un empobrecimiento de elementos HFSE menor de 10, anomalías negativas de Nb y anomalías positivas de Th, Ce, nos indican que ambos grupos de intrusivos están relacionados a un marco tectónico de subducción de placas. Los contenidos químicos de la Superunidad Yarabamba y Challaviento Ce/Y, Ga/Al e Y, Y+Nb y Rb y Nb se deban a la contaminación durante el engrosamiento de la corteza terrestre durante el Cretáceo-Neógeno y su ambiente tectónico es de los Granitoides de Arco Volcánico (GAV).

Palabras clave: Diagramas geoquímicos, elementos mayores, trazas, tierras raras, ambiente tectónico

ABSTRACT

The Yarabamba and Challaviento Super Units of intrusive rocks in Southern Peru, according to their composition of major, minor and trace elements and also the graphing of various geochemical diagrams, show for both groups a degree of evolution by fractional crystallization. Also, both Units are of alkaline nature and belong to high-K calc-alkaline series.

Rocks of both groups are also of metaluminous nature with Sr and Rb content showing a strong magma assimilation and differentiation. The LILE element enrichment (< 100), HFSE element depletion (<100), Nb negative anomalies and Th, Ce positive anomalies, indicate that both groups are related to a tectonic setting of plate subduction. The chemical composition of both super units may be due to contamination during crustal thickening of Cretaceous-Neogene age. They belong to tectonic environment from volcanic Arc Granitoids (VAG).

Key words: Geochemical diagrams, major elements, trace elements, REE, Tectonic environment.

¹ Docentes de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. E-mail: hriveram@unmsm.edu.pe

² Estudiantes de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

I. INTRODUCCIÓN

El alcance del presente trabajo involucra el tratamiento estadístico y graficación de los valores de los elementos mayores, menores y trazas de las rocas intrusivas pertenecientes a las Superunidades Yarabamba y Challaviento al sur del Perú.

Los objetivos generales son la evaluación de los elementos mayores, menores, trazas y tierras raras; obtener los diagramas de clasificaciones como TAS (Total alcalis-silice), diagrama de Hacker, clasificación por saturación de sílice y alúmina y caracterizar geoquímicamente los intrusivos y encontrar sus diferenciación química y su relación con la tectónica de la región sur del Perú.

II. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra entre los paralelos 16° y 18.30° latitud sur, comprende a los departamentos de Arequipa, Moquegua, Puno y Tacna (Figura N.º 1).

En esta área INGEMMET colectó 20 muestras de rocas intrusivas pertenecientes a la Superunidad Yarabamba y 7 muestras de rocas intrusivas de la Superunidad Challaviento, analizando a todas ellas por análisis de rocas total incluyendo los óxidos mayores (08), menores (03) y trazas (35) con el doble fin de caracterizar geoquímicamente y efectuar el análisis correlacional de las Superunidades a investigar.

III. GEOLOGÍA REGIONAL

La evolución magmática en la zona de estudio es bastante compleja, porque interactúan elementos tectónicos globales y magmatismo asociado con distorsiones de la corteza litosférica (Martínez, W. *et al.*, 2003).

La Superunidad Challaviento: Wilson y García (1962) establecen que los intrusivos más importantes son los batolitos de granodiorita mapeada como granodiorita Toquepala-Challaviento que afloran en los cuadrángulos

de Palca y Pachia y que tiene la composición mineralógica siguiente: Plagioclasa 54 %, ortosa 4 %, hornblenda 26 %, biotita 19 %, cuarzo 4 %, zircón y esfena 3.5 %. Los intrusivos granodioríticos parecen haberse emplazado por medio del proceso denominado “stopping” e inyección forzada, es bastante común encontrar xenolitos cerca de los contactos, los cuales constituyen el 20-30 % de la roca y de acuerdo a las correlaciones estratigráficas se le asignó una edad del Terciario

Acosta *et al.* (2011) mencionan que la Superunidad Challaviento descrita por Sánchez, A. (1983) como plutón de Tarata y Ataspasca aflora al norte y NE de Palca a lo largo del sistema de fallas Incapuquio; litológicamente está compuesta de granodiorita gris clara y de textura hipidiomórfica. Los trabajos de Wilson (1962) le asume una edad del Terciario inferior; Martínez *et al.* (2003) lo describen como Batolito Challaviento y Acosta *et al.* (2011) proponen, por consideraciones geocronológicas, geoquímicas, petrográficas y por ubicación y extensión como Superunidad Challaviento y está compuesta de gabro, diorita, granodiorita y granitos.

Las dataciones realizadas en tonalitas y granodiorita corroboran la edad Eoceno medio a la Superunidad Challaviento con una edad de 41.6 MA (Martínez *et al.* 2003) coincidentes con otras edades tomadas por otros autores.

La Superunidad Yarabamba: Los estudios inicialmente se realizaron en la quebrada Yarabamba, de donde proviene su nombre. Steward (1968) describe tonalitas a granodioritas con abundante xenolitos máficos alterados. Cobbing y Pitcher (1983) y Pitcher *et al.* (1985) describen que está compuesta de granodiorita a monzogranitos que afloran a lo largo de 200 km entre las localidades de Palca, Torata, Omate, Puquina, Yarabamba y Vitor formando cuerpos tabulares y elongados en dirección predominante NO-SE

Inicialmente estas rocas fueron mapeadas como Super Unidad Linga Arequipa (al sur de Arequipa) y Linga Yarabamba (al este y SE de Arequipa). Acosta *et al.* (2011) por simili-



Figura N.º 1. Plano de ubicación de muestras de rocas intrusivas de las Superunidades de Challaviento y Yarabamba.

tud geoquímica proponen la denominación única de Super Unidad Yarabamba, compuesta desde gabros a granitos. Las dataciones radiométricas en estudios regionales realizados en la Superunidad Yarabamba por los métodos de K-Ar, Ar-Ar, Rb-Sr y U-Pb arrojan una edad de entre 62-58 MA y se le asigna la edad de Paleoceno inferior.

IV. ANÁLISIS DE LA ESTADÍSTICA Y DIAGRAMAS DE LAS VARIABLES

Los diagramas de variación son usados con diferentes propósitos en petrología, tienen la ventaja de ser más sencillos de interpretar que los números globales en las tablas de geoquímica que, a primera vista, pueden ser difíciles de leer e interpretar. Gracias a estos diagramas se pueden observar con facilidad comportamientos y tendencias petrológicas que aporten información relevante en procesos petrológicos como la cristalización fraccionada, fusión parcial o líneas de mezcla. En este trabajo se utilizan los diversos diagramas de uso geoquímico, tanto de elementos mayores y elementos traza, iniciamos con los elementos mayores:

Elementos Mayores

4.1 Grado de Oxidación

La Superunidad Challaviento y la Superunidad Yarabamba muestran un contenido de Fe total, Fe₂O₃ y FeO mostrada en la Tabla N.º 1.

Tabla N.º 1. Grado de oxidación

Promedio	Challaviento	Yarabamba
Fe ₂ O ₃	4.926	5.525
FeO	2.586	2.851
Fe total FeO	7.512	8.376
	7.024	7.828
total Fe ₂ O ₃ total	7.796	8.689

Arrojan un notorio incremento en la Superunidad Yarabamba debido a que las rocas intrusivas han sufrido oxidación, ya sea en un último estadio de cristalización o en procesos posteriores tales como alteraciones hidrotermales, etc., por lo cual se tiene una gran cantidad de hierro férrico relativo al hierro ferroso.

4.2 Saturación de Alúmina

Los parámetros de clasificación se basan en los óxidos mayores de Al₂O₃, CaO, K₂O y Na₂O recalculados en concentraciones molares. La Figura N.º 2 muestra el promedio de saturación de alúmina de acuerdo a las proporciones moleculares (Peso % / peso molecular del óxido) nos indica que las dos Superunidades son mayormente de saturación metaluminosa. El carácter peraluminoso de algunas rocas tanto en la S.U. Challaviento y Yarabamba, se debe a que han sufrido alteración hidrotermal del tipo sericitico como también por la inclusión de fragmentos líticos de estas rocas.

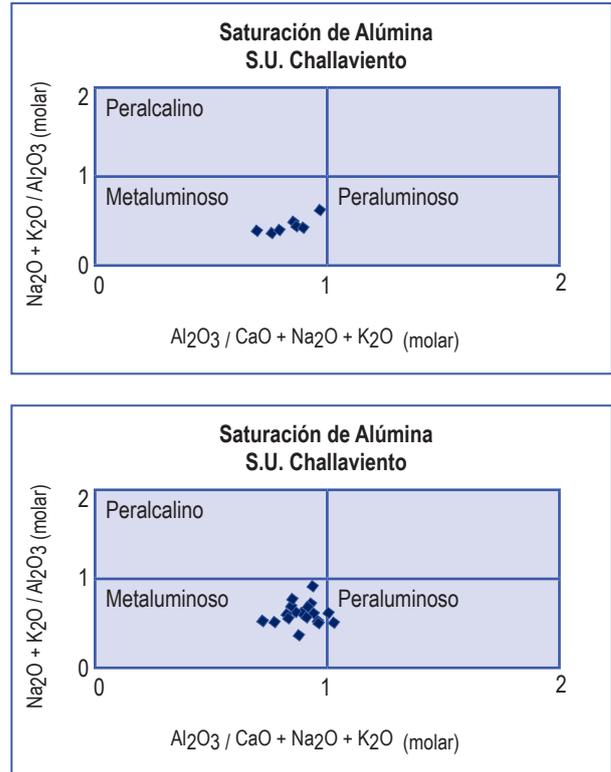


Figura N.º 2. Saturación de alúmina de las superunidades de Challaviento y Yarabamba

4.3 Correlaciones de Pearson

En líneas generales existe una muy buena correlación negativa entre la sílice y los demás óxidos y con respecto a la alúmina tiene alta correlación positiva y negativa con los demás óxidos en ambas Superunidades, lo que indica que las rocas intrusivas de las Superunidades de Challaviento y Yarabamba se han contaminado en su ascenso probablemente debido a su gran profundidad de origen.

4.4 Diagramas de Harker

Los diagramas donde se grafican óxidos contra SiO₂ son conocidos como diagramas de Harker. En este caso, se grafica el SiO₂ en el eje-X contra los elementos más relevantes en el eje-Y.

Los rangos de variación entre ellos sugieren un grado de evolución por cristalización fraccionada de minerales ferromagnesianos y plagioclasas cálcica.

Las correlaciones negativas entre el SiO₂ y P₂O₅ y TiO₂ corroboran también la evolución por cristalización fraccionada en ambos grupos de intrusivos Ambas Superunidades muestran un fraccionamiento de K y Na en el tiempo enriqueciéndose de estos álcalis con el incremento de la sílice, mientras que los demás óxidos disminuyen con el incremento de la sílice.

Con respecto a los diagramas Harker de la sumatoria de los óxidos e₂O₃, CaO + MgO, y Na₂O+K₂O (Figura N.º 3), se observa que en las dos Superunidades los elementos Fe²⁺+Fe³⁺, Ca+Mg disminuyen con el incremento de la sílice, mientras que el Na+K aumenta con el incremento de la sílice.

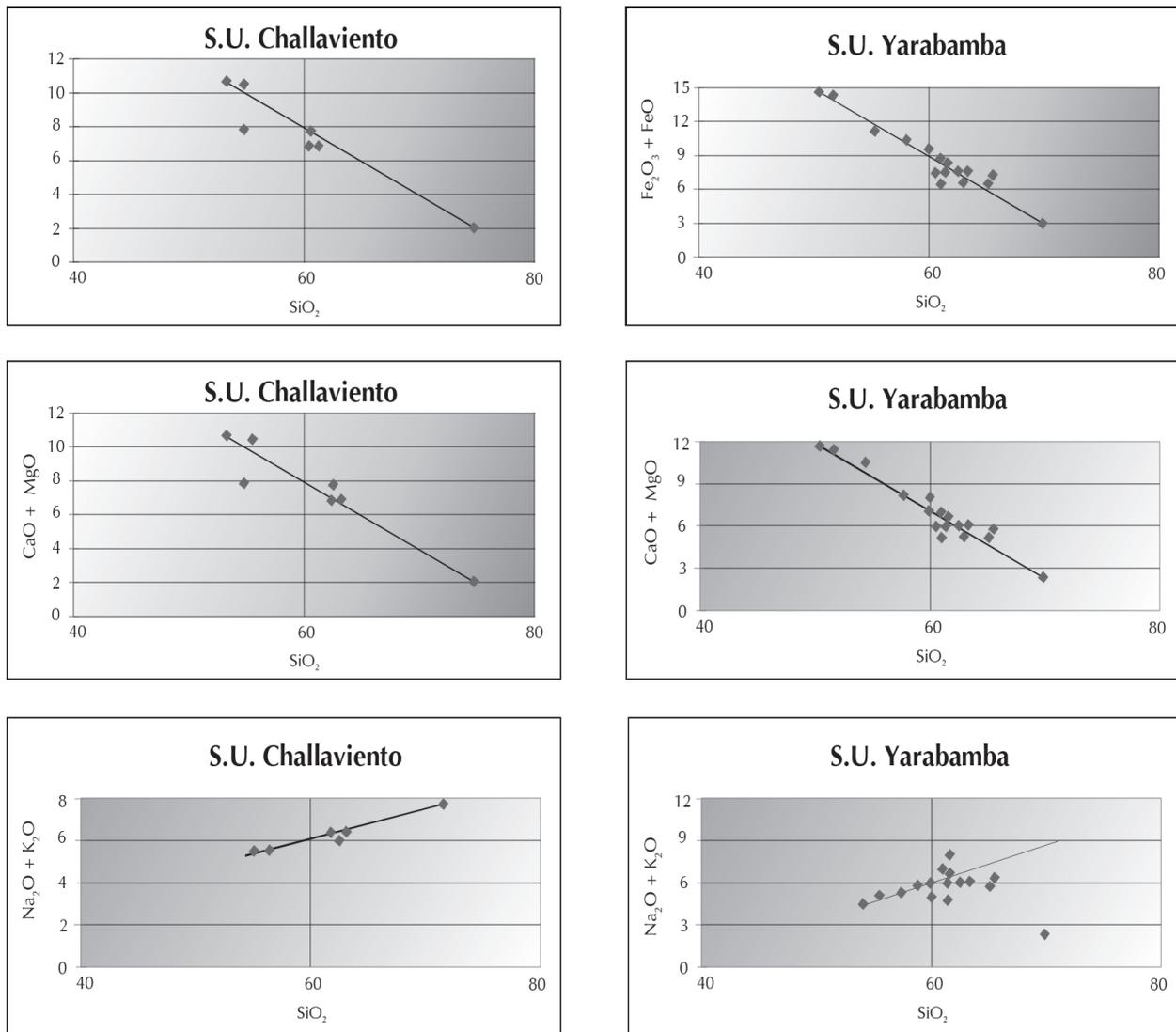


Figura N.º 3. Diagramas Harker Super Unidades de Challaviento y Yarabamba

4.5 Diagrama Sílice vs. Álcalis Total-TAS

La Superunidad Challaviento, según el Diagrama TAS de Le Bas 1986 (Figura N.º 4), muestra una alta diferenciación que abarca mayormente el campo de las tonalita (42.86 %) seguido de una serie de rocas de naturaleza granodiorita (42.86 %) y en menor proporción rocas ácidas como el granito (14.3 %), en líneas generales está constituida de rocas felsicas. La subdivisión de las rocas intrusivas en alcalinas y subalcalinas (toleíticas) sobre un diagrama de álcalis vs sílice.

La Superunidad Yarabamba (Figura N.º 4) muestra una alta diferenciación que abarca desde el campo de los gabros (5 %), seguido de las dioritas (5 %) y monzonita (40 %), luego de una serie de rocas de naturaleza tonalita (20 %), granodiorita (25 %) y en menor proporción el granito (5 %), en líneas generales está constituida mayormente de rocas intermedias a ácidas

4.5.1 Diagrama R1-R2

El Diagrama R1-R2 de De la Roche *et al.* (1980) propone un esquema de clasificación para rocas plutónicas basado en la proporción en milicaciones, de ocho variables (elemen-

tos mayores) como parámetros. Esto es importante, ya que involucra mayor cantidad de elementos al usar el diagrama, por lo tanto arrojan una clasificación más precisa.

En la Superunidad Challaviento, de acuerdo al diagrama R1-R2 (Figura N.º 5), las muestras caen en los campos de monzogranito, tonalita, diorita y gabro. La Superunidad Yarabamba, de acuerdo al mismo diagrama (Figura N.º 5), cae en los campos del granito alcalino, monzogranito, granodiorita, cuarzo-monzonita, monzodiorita y monzonita lo que muestra una gran variedad petrográfica.

4.6 Diagrama de Irvine-Baragar: SiO₂ vs K₂O+Na₂O

El diagrama de álcalis vs. sílice indica la subdivisión de las rocas intrusivas en alcalinas y subalcalinas (toleíticas).

Las rocas de la Superunidad Challaviento, de acuerdo al Diagrama de Irvine-Baragar SiO₂ vs K₂O + Na₂O (Figura N.º 6), corresponden mayormente a la serie subalcalina.

Las rocas de la Superunidad Yarabamba (Figura N.º 6) corresponden mayormente a la serie subalcalina, aunque existen algunas pocas rocas alcalinas.

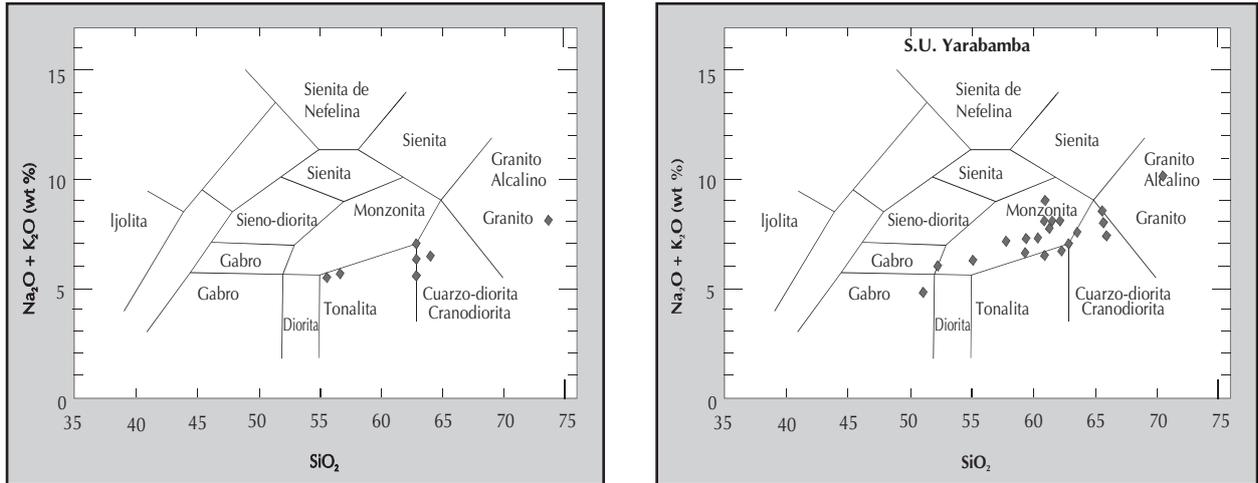


Figura N.º 4. Diagrama TAS de las Superunidades de Challaviento y Yarabamba

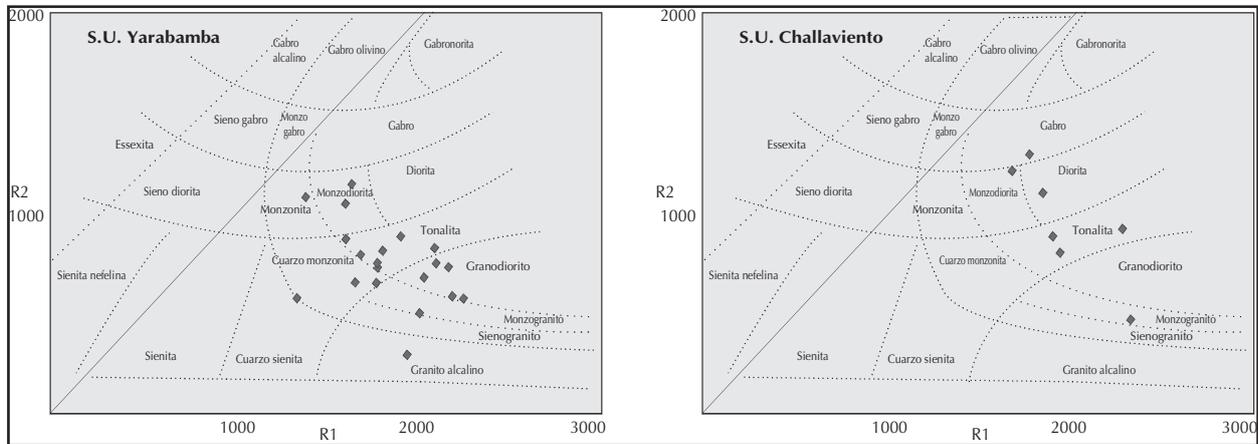


Figura N.º 5. Clasificación en millones segunde la roche (1980) de las S.U. Yarabamba y Challaviento.

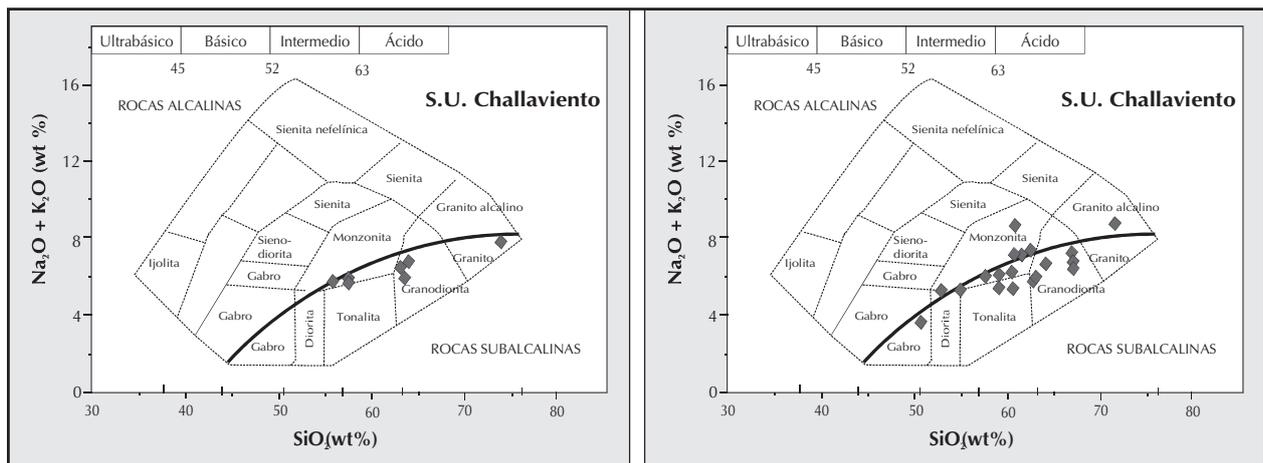


Figura N.º 6. Clasificación de las rocas intrusivas de las S.U. Yarabamba y Challaviento según Irvine-Baragar.

4.7 Diagrama de Ringwood: SiO₂ vs K₂O

La subdivisión de las rocas subalcalinas se realiza usando el diagrama K₂O vs. sílice en rocas de baja, media y alto contenido de K₂O.

Con respecto al Diagrama de SiO₂ vs K₂O de Ringwood (1989) y Le Maitre (1989) (Figura N.º 7), la S.U. Yarabamba y Challaviento la clasificación geoquímica de las

rocas subalcalinas es para ambas de la serie calco-alkalina de alto potasio.

4.8 Variación Longitudinal de Óxidos Mayores

Para conocer la distribución de los elementos mayores (óxidos) en los intrusivos de las dos Superunidades (Figura N.º

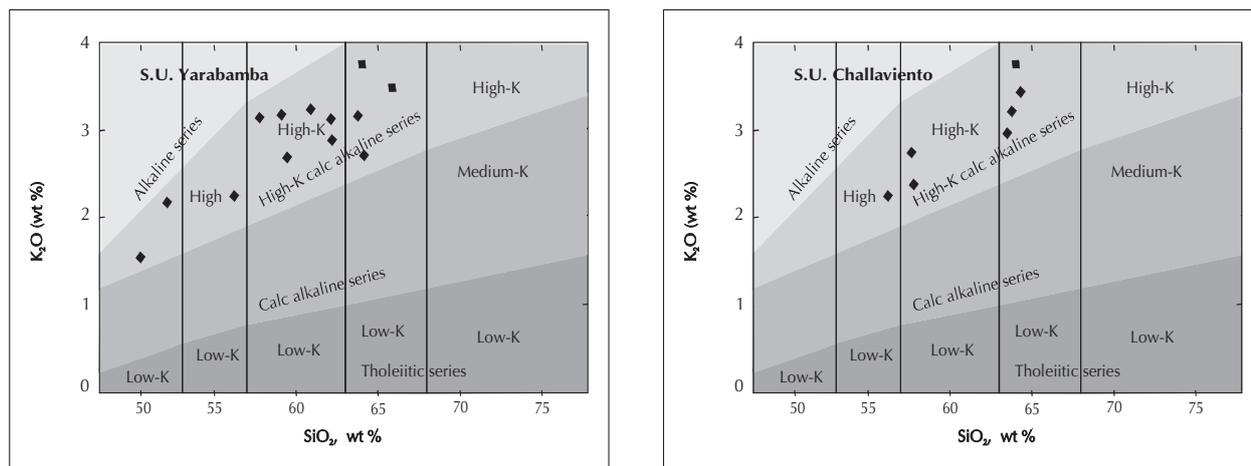


Figura N.º 7. Diagrama de Ringwood de las S.U. Yarabamba y Challaviento

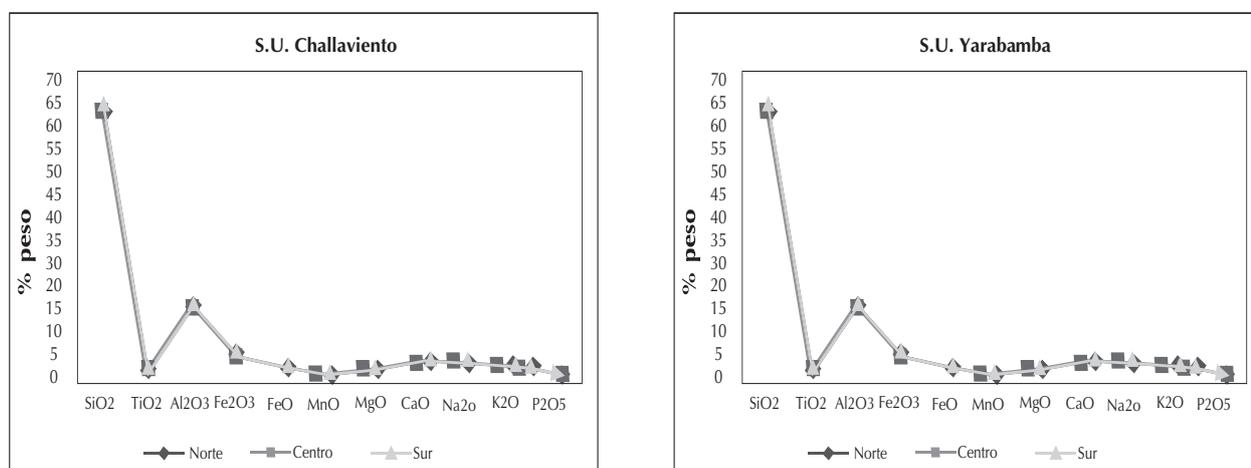


Figura N.º 8. Variación longitudinal de los óxidos mayores en S.U Yarabamba y Challaviento.

8), de acuerdo a su ubicación geográfica se analizaron las muestras en forma longitudinal al eje andino. Los valores de los óxidos en los tres sectores de ambas Superunidades muestran una homogeneidad en sus promedios, las diferencias de abundancias son tan mínimas, cuyas curvas tienen un gran similitud, lo que indica que han sufrido una cristalización normal

A continuación se usan los diagramas de elementos tierras raras y trazas.

Elementos Tierras Raras y Trazas

4.9 Diagrama de Tierras Raras Normalizadas

Los promedios de abundancia de Tierras Raras de ambos Grupos de intrusivos fueron normalizados de acuerdo al "Índice de los condritos de Wakita", con el fin de evitar el efecto Oddo-Harkins.

Una vez normalizados los valores de todas las Tierras Raras se proyectan en la ordenada en logaritmo de base 10 (en un papel o gráfico semilogarítmico).

Hay un enriquecimiento en ambas Superunidades Challaviento y Yarabamba en Tierras Raras Ligera-TRL- hasta

el Tb sobre el intervalo 10, y un empobrecimiento en Tierras Raras Pesadas-TRP a partir del Dy por debajo del intervalo 10 en ambos Grupos de intrusivos, la presencia de granate en la fuente no es muy clara, pero este empobrecimiento de TRP por debajo del intervalo 10 podría indicar su presencia.

La anomalía negativa del Eu con respecto al Sm y al Gd en el espectro normalizado de REE de la Superunidad Yarabamba se estima como indicadora de separación de las plagioclasas por cristalización fraccionada de la roca fuente, mientras que en la S.U. Challaviento no es evidente esta anomalía por lo que se estima que no hubo dicho fraccionamiento.

El diagrama spider (Figura N.º 9) nos demuestra una cristalización fraccionada de ambas Superunidades.

4.10 Variación litológica de Tierras Raras

Con respecto a la concentración de las Tierras Raras de acuerdo a las litologías (Figura N.º 10), en la S.U. Yarabamba se observa que los granitos tienen la mayor concentración de TRL y TRP, seguida de la diorita y luego por las monzonitas, con abundancias superiores al intervalo 10. Distantes en abundancia se encuentran la

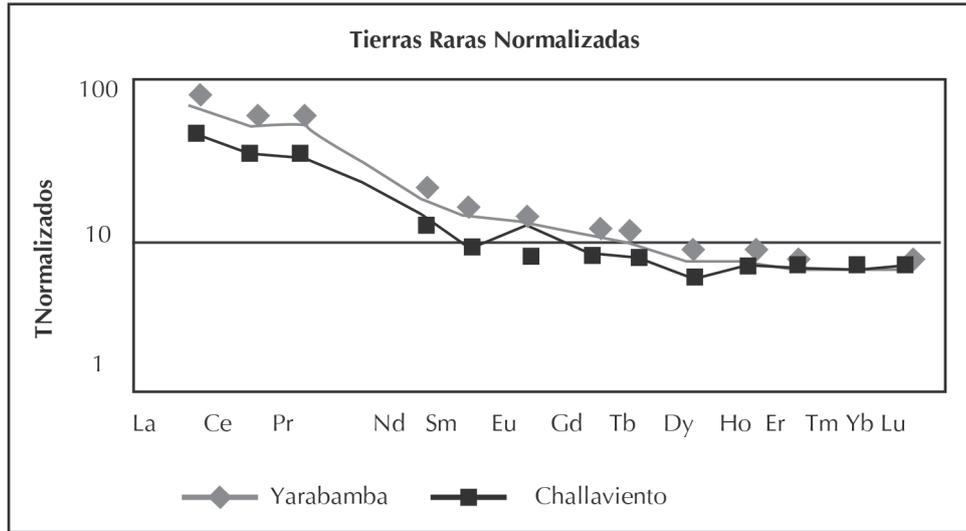


Figura N° 9. Diagrama spider de Tierras Raras de las S.U Yarabamba y Challaviento.

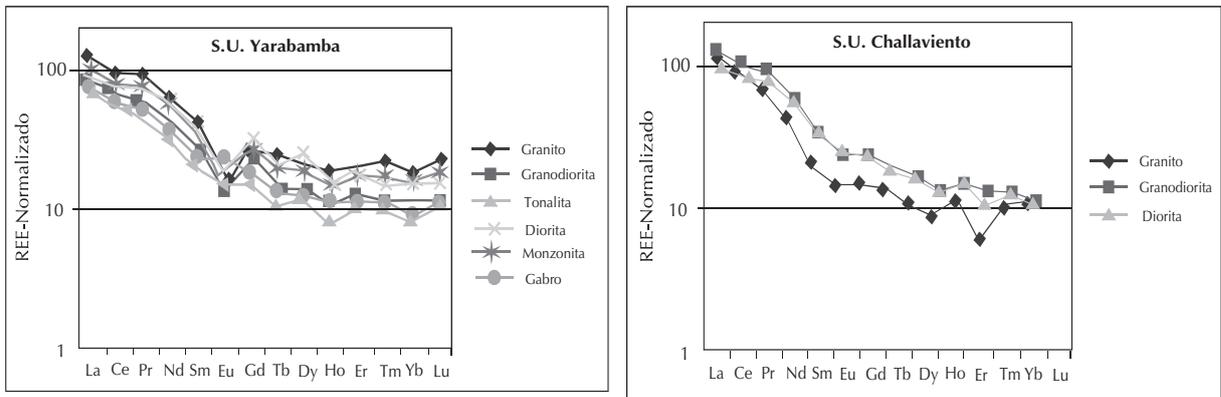


Figura N.º 10. Variación de Tierras Raras de acuerdo a las litologías de las S.U. Yarabamba y Challaviento.

granodiorita, gabro y por último las tonalitas, es notorio el empobrecimiento de las TRP pero en las cercanías del intervalo 10. La anomalía negativa de Eu se presenta en todas las litologías de esta Superunidad, lo que indica el fraccionamiento de las plagioclasas. La abundancia de las Tierras raras es mayor en las rocas ácidas, luego en básica e intermedia.

Con respecto a la abundancia de las Tierras Raras en la S.U. Challaviento (Figura N.º 10), se observa que la mayor concentración de TRL y TRP se encuentra en la granodiorita, seguido de la diorita y por último el granito. El granito se encuentra empobrecido desde el Eu hasta el Lu, presenta una anomalía negativa de Tm; mientras que la granodiorita y diorita se empobrece desde el Ho al Lu pero cercano al intervalo de 10.

4.11 Diagrama de proporciones de Tierras Raras y variantes

Las proporciones de TRL y TRP y sus variantes —elementos trazas— fueron normalizadas según los valores de MORB (Middle Oceanic Ridge Basalt), (Sm, Yb, Sr, Rb) según Pearce (columna 10) y (La) según Bevins (columna 11) (Rollinson, 1993) y los demás se efectuaron sus cálculos en ppm y en porcentaje de acuerdo a su análisis (Figura

N.º 11). La proporción La/Yb(n) vs. Yb en Yarabamba muestra valores entre 8 y 25 ppm en La/Yb, mientras que en Challaviento muestra valores por encima de 20 en La/Yb(n).

Los altos contenidos de Rb >400 ppm y Sr >700 ppm en el Yarabamba y de <100 a 400 de Rb y >200 a 600 ppm en Sr en Challaviento.

El leve incremento de la proporción La/Yb(n) es compatible con el incremento de SiO₂ a partir de 60 % hasta 75 % en Yarabamba y un leve incremento a partir del 70 % en Challaviento.

Todo este análisis de las proporciones La/Yb(n) vs. Yb nos conduce a que la Superunidad Yarabamba debe sus contenidos mencionados a la contaminación durante el engrosamiento de la corteza en el Cretáceo-Neógeno sobre >40 km de grosor, mientras los valores de Challaviento indica menor contaminación cortical. Los contenidos de Sr y Rb nos indican una fuerte asimilación y diferenciación de los magmas en ambos grupos de intrusivos

4.12 Diagramas Spider Multielementales

Los diagramas multielementales normalizados están basados sobre un grupo de elementos incompatibles con respec-

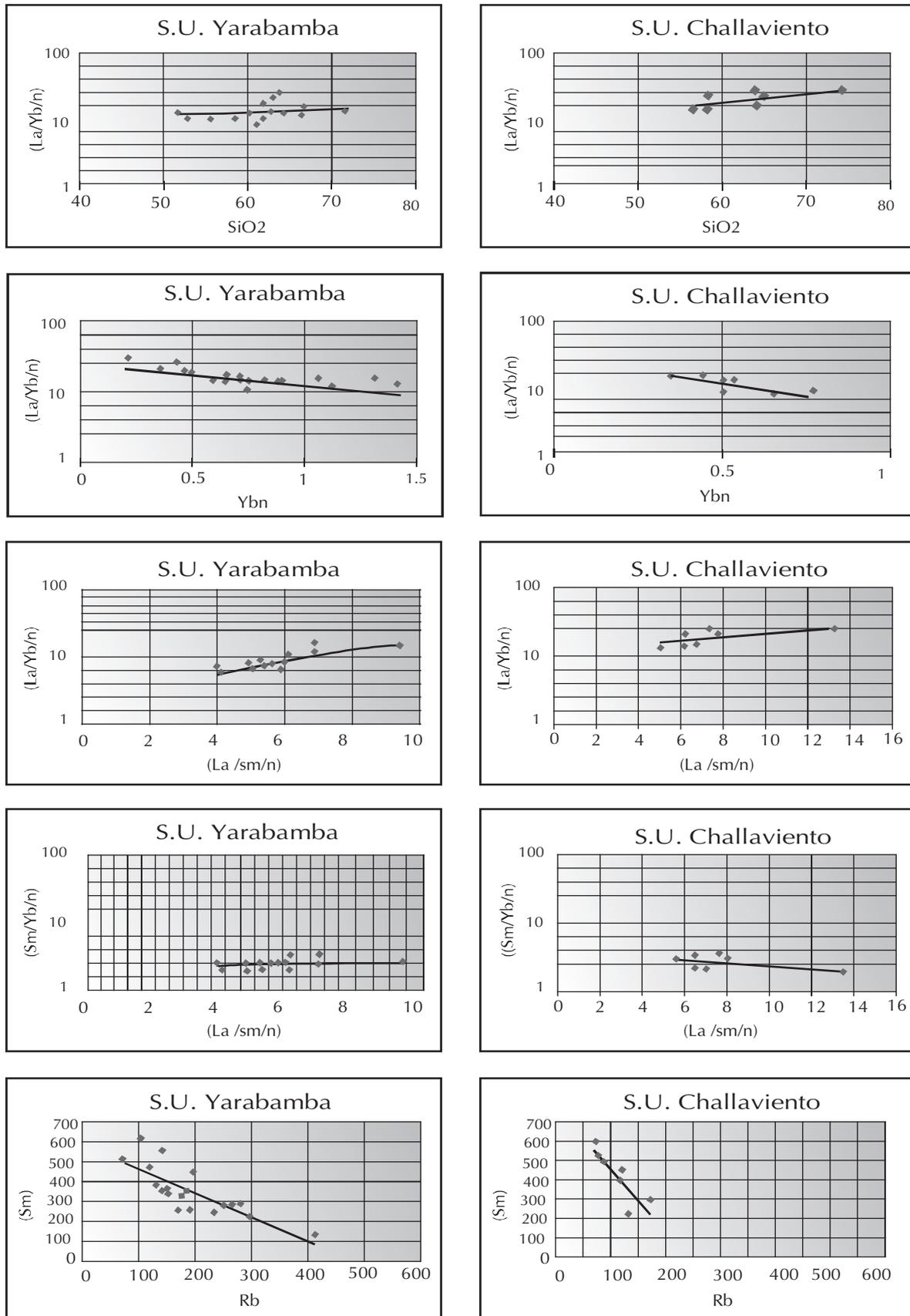


Figura N.º 11. Diagrama de proporciones de tierra raras y variantes.

to a la mineralogía del manto, ellos son una extensión de los tradicionales diagramas de Tierras Raras Normalizadas a las condritas que son más familiares.

Ellos son particularmente usados como una manera de representar la química de los basaltos, aunque su uso se ha extendido a todas las rocas ígneas y sedimentarias.

Las concentraciones de los elementos LILE (elementos de gran radio iónico) que por ser más móviles puede estar controlado por fluidos acuosos, pero estos elementos están concentrados en la corteza continental y también se puede utilizar como un indicador de una contaminación cortical del magma.

La Figura N.º 12 es un diagrama spider multielemental que nos muestra un enriquecimiento de los elementos LILE (<100) y un empobrecimiento de elementos HFSE (elementos de alta valencias) menor de 10, además de las anomalías negativas de Nb y anomalías positivas de Th, Ce, nos indica que ambos grupos de intrusivos están relacionados a un marco tectónico de subducción de placas.

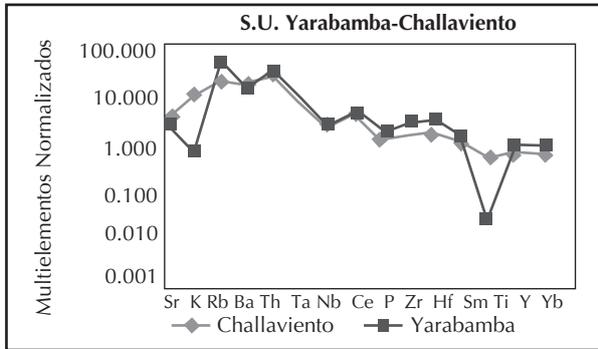


Figura N.º 12. Diagrama spider Multielemental de las S.U Yarabamba y Challaviento.

4.13 Variación litológica de la abundancia multielemental

Las Figuras N.ºs 13 y 14 muestran el espectro multielemental en las diferentes litologías, tanto para el Yarabamba y Challaviento. Se denota que los multielementos se incrementan con respecto a las litologías desde rocas ácidas a intermedias en la S.U Yarabamba, mientras que en la S.U Challaviento se incrementan en rocas intermedias disminuyendo en rocas ácidas y en rocas básicas son menores los contenidos.

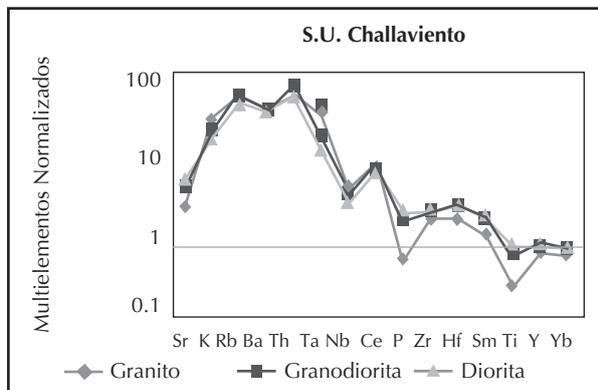


Figura N.º 13. Variación litológica S.U. Challaviento.

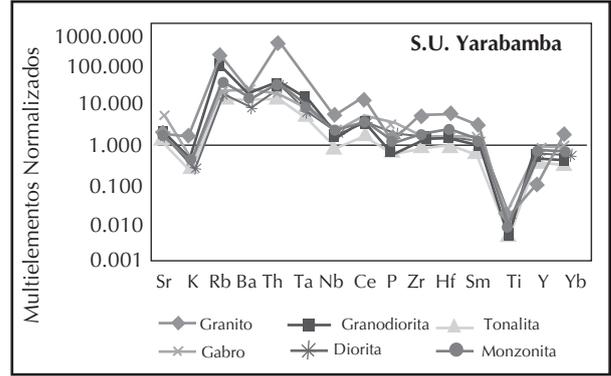


Figura N.º14. Variación litológica S.U Yarabamba

4.14 Diagramas de elementos de transición

Se usó el ploteo de los metales de transición, salvo el Sc y Cr por no tener análisis, normalizando con los valores de Sun (1982) manto primitivo (Rollinson, 1993). Presentan anomalías positivas de V, Fe, Cu y Zn y una anomalía negativa de Ni en ambos grupos de intrusivos y además ellos muestran un agotamiento del Ti, Mn, Co. El Co y Ni son muy variables y sus concentraciones muy bajas que no reflejan los valores ígneos originales. En líneas generales con respecto a este diagrama de metales de transición (Figura N.º 15), la S.U. Challaviento presenta una mayor concentración Ti, V, Ni y la S.U Yarabamba una mayor concentración de Mn, Fe, Co, Cu y sus contenidos son a nivel de elementos trazas menores de 1 ppm, salvo el V, Fe, Cu, Zn.

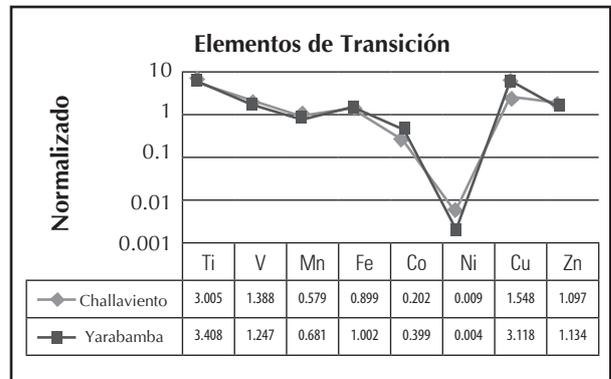


Figura N.º 15. Diagrama de metales de transición.

V. DIAGRAMAS DISCRIMINANTES DE AMBIENTE TECTÓNICO

5.1 Profundidad de la fuente magmática

Para estimar la profundidad de las cámaras magmáticas donde se generan los magmas, se ploteó los datos del Ce/Y vs. SiO₂ de ambas Superunidades en el diagrama Ce/Y vs. SiO₂ propuesto por Mantle y Collins (2008), en donde se observa que los intrusivos de la S.U. Challaviento (Figura N.º 16) se formaron dentro de una corteza con espesor menor de 40 km, mientras que los intrusivos de la S.U. Yarabamba en una corteza mayor de 60 km de profundidad (Figura N.º 17)

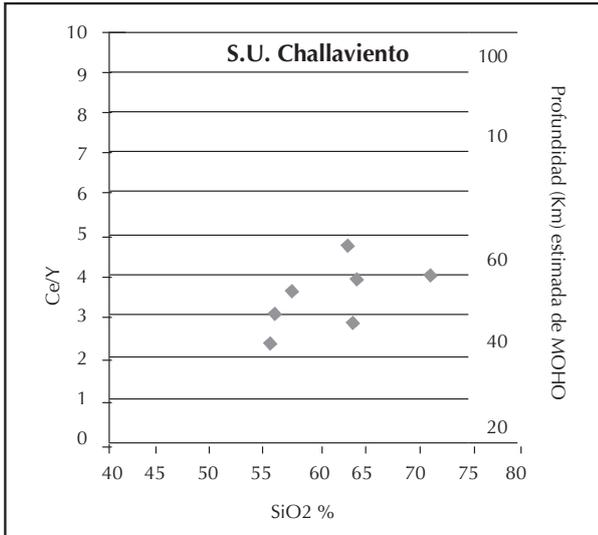


Figura N.º 16. Profundidad de la fuente magmática de la S.U Challaviento.

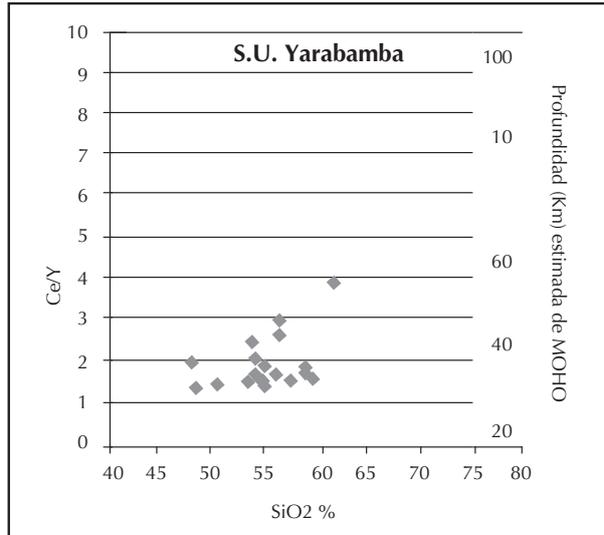


Figura N.º 17. Profundidad de la fuente magmática de la S.U Yarabamba

5.2 Diagrama de Shand

El diagrama Shand (Maniar y Piccoli, 1989) es también una alternativa a las categorizaciones de los granitoides de magnetita-ilmenita ya que existe confusión en las definiciones y características. Este diagrama sirve para clasificar el ambiente tectónico en el que se produce un granitoide.

En los resultados de la Figura N.º 18, los intrusivos de la S.U. Challaviento inciden dentro del campo metaluminoso hacia los peraluminoso pertenecen a los granitoides de arcos continentales, posorogénicos.

En la Figura N.º 19 los intrusivos de la S.U Yarabamba inciden mayormente en el campo metaluminoso y pertenecen a los granitoides de arcos continentales.

5.3 Diagrama de Whalen

En el diagrama de Whalen *et al.* (1987) donde se grafican los valores de Y (ppm) versus los valores de la relación, $Ga/Al \cdot 10,000$ constituyen dos campos separados uno correspondiente a los granitos del Tipo **I** (ígneo) y **S** (sedimentario) y el otro campo al de los granitos tipo **A** (Anorogénicos), ambas Superunidades de Challaviento

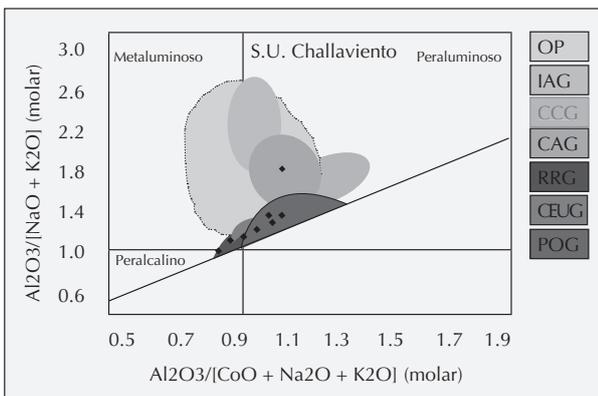


Figura N.º 18. Diagrama de Shand S.U Challaviento.

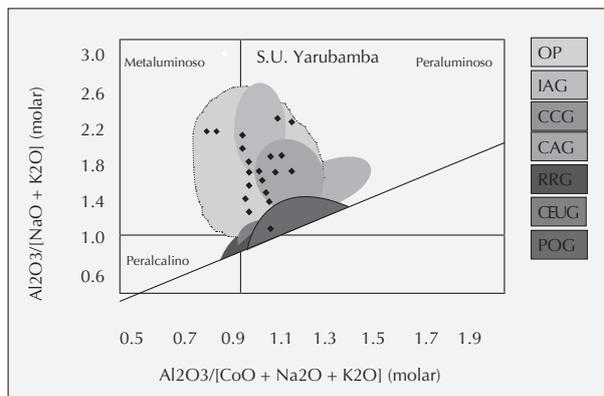


Figura N.º 19. Diagrama de Shand S.U Yarabamba.

(Figura N.º 20) y Yarabamba (Figura N.º 21) corresponde a los campos de los granitos Tipo I y S.

5.4 Diagrama de Pearce

Diagrama de discriminación de ambiente tectónico para granitos donde se grafican los valores de $Y+Nb$ (log) versus Rb (log) según Pearce *et al* 1984, Los intrusivos de la S.U. Challaviento (Figura N.º 22) caen todas las muestras en el campo de granitos de arco volcánico, mientras que los intrusivos de la S.U. Yarabamba (Figura N.º 23) la mayoría caen en el campo de granitos de arco volcánico y unos pocos en el campo de granito intraplaca.

5.5 Diagrama de Pearce: (Y+Nb) vs Nb

Según Pearce, el diagrama $Y+Nb$ (log) vs. Nb (log) nos muestra los diferentes ambientes tectónicos similares al anterior diagrama. En la S.U. Yarabamba (Figura N.º 24) las rocas caen mayormente en el campo de los granitos de arco volcánico y pocos en el campo granitos de intraplaca. Mientras que el total de las rocas de la S.U. Challaviento (Figura N.º 25) cae en el campo de los granitos de arco volcánico, similares ambientes tectónicos encontrados en el diagrama $Y+Nb$ vs. Rb .

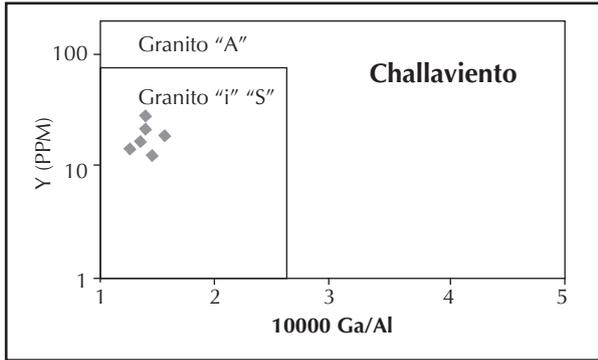


Figura N.º 20. Diagrama de Whalen S.U. Challaviento.

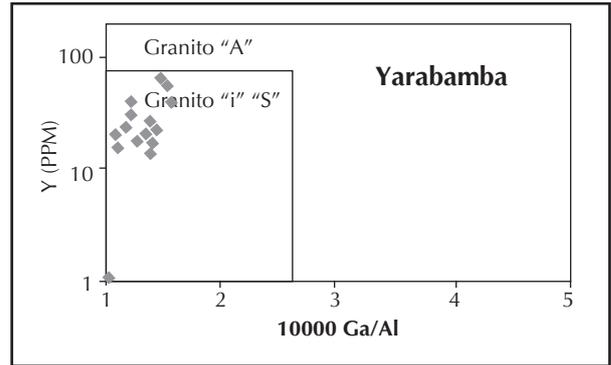


Figura N.º 21. Diagrama de Whalen S.U. Yarabamba.

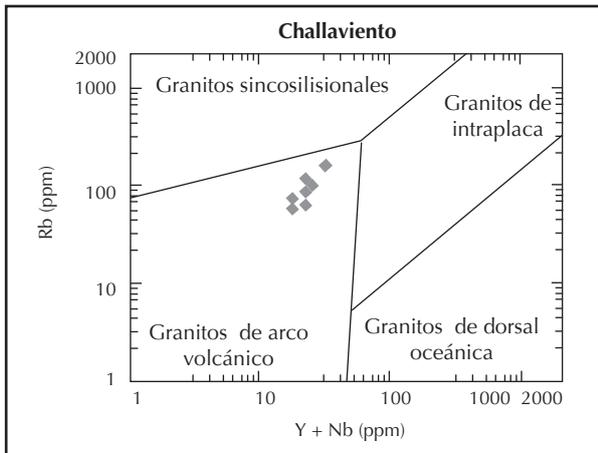


Figura N.º 22. Diagrama de Pearce (Y+Nb) vs. Rb S.U. Challaviento.

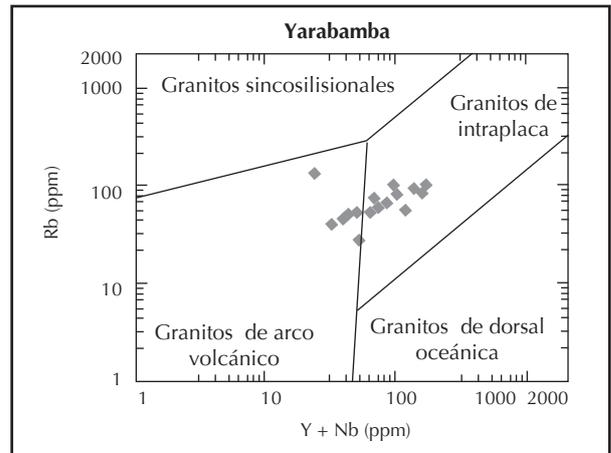


Figura N.º 23. Diagrama de Pearce (Y+Nb) vs. Rb S.U. Yarabamba.

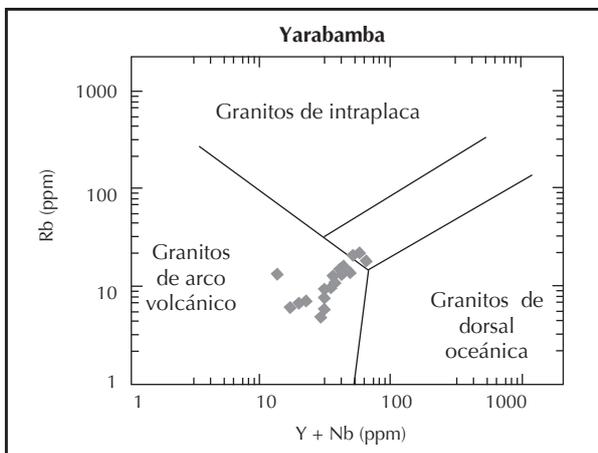


Figura N.º 24. Diagrama (Y+Nb) vs. Nb S.U. Yarabamba

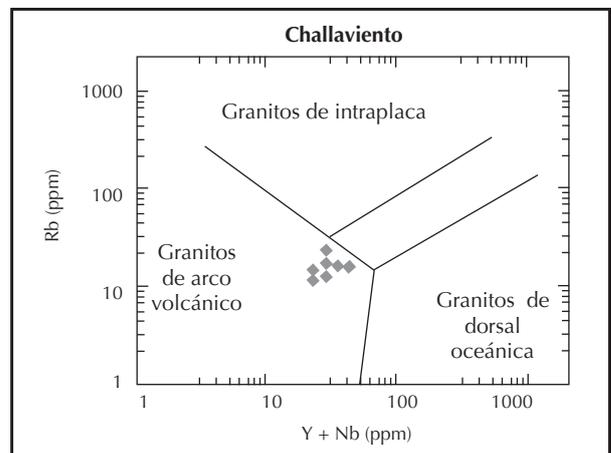


Figura N.º 25. Diagrama (Y+Nb) vs. Nb S.U. Challaviento.

VI. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Este estudio geoquímico de las rocas es complementario al estudio petrográfico microscópico, porque éste muchas veces es incompleto, dado que la mayoría de los minerales admiten considerables sustituciones de otros elementos compatibles tanto en su radio iónico como en su carga eléctrica, así podemos encontrar rocas de igual composición mineralógica pero con una distinta composición química. Pero también se puede encontrar que un material geológico de composición química determinada puede agruparse en formas mineraló-

gicas diferentes, esto es muy frecuente en la naturaleza y se le denomina heteromorfismo.

Se intentó a través del comportamiento geoquímico de dichos elementos confirmar o descartar el origen, la evolución y clasificación del magmatismo plutónico en el Terciario, así como determinar el ambiente de formación de estas rocas relacionadas al ambiente geotectónico. Por ello esta investigación geoquímica basada en análisis químico debe estar acompañada de estudios petrográficos, complemento necesario en la investigación petrogenética de las rocas.

VII. CONCLUSIONES

1. El grado de oxidación ha demostrado que la S.U. Yarabamba ha sufrido una mayor oxidación ya sea en su último estadio de cristalización o en procesos posteriores como alteraciones hidrotermales por lo cual tiene gran cantidad de hierro férrico relativo al hierro ferroso.
2. El análisis de saturación de alúmina nos indica que las rocas intrusivas en su mayoría en ambas Superunidades son de naturaleza metaluminosas.
3. El análisis de los elementos mayoritarios (óxidos) con la correlación de Pearson indica que en ambas Superunidades los rangos de variación sugieren un grado de evolución por cristalización fraccionada, confirmada por los diagramas Harker.
4. El análisis de los diagramas sílice vs. álcalis total (TAS) muestra en la S.U. Challaviento una diferenciación magmática en rocas félsicas y la S.U. Yarabamba de rocas intermedias a félsicas.
5. Los diagramas R1 vs. R2 basados en las proporciones milicatiónicas muestran que la S.U. Challaviento varía de monzogranito, tonalita, diorita y gabro y la S.U. Yarabamba de granito alcalino, monzogranito, granodiorita, cuarzo monzonita, monzodiorita y monzonita lo que muestra una gran variedad petrográfica.
6. El análisis de los diagramas Irvine- Baragar (SiO_2 vs $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$) nos indican que ambos Grupos de intrusivos son de naturaleza subalcalinas.
7. El análisis de los diagramas de Ringwood (SiO_2 vs K_2O) nos indica que ambos grupos son de la Serie Calco alcalina de alto K.
8. El análisis de los diagramas de Tierras Raras (REE) normalizadas indica que ambos grupos de intrusivos derivan de una cristalización fraccionada, en la que hay un enriquecimiento de tierras raras ligeras hasta el Tb sobre el intervalo 10 y un empobrecimiento en tierras raras pesadas menor de 10.
9. La anomalía negativa del Europio (Eu) en el Yarabamba se estima como producto del fraccionamiento de plagioclasas mientras que en el Challaviento no es evidente esta anomalía.
10. La variación litológica de la abundancia de las REE nos indica que en S.U. Yarabamba los granitos tienen la mayor concentración de tierras raras ligeras y pesadas seguidas de la diorita, monzonita con abundancias superiores al intervalo 10 y un empobrecimiento de tierras raras pesadas en el gabro, tonalita y granodiorita. En la S.U. Challaviento la mayor concentración de tierras raras ligeras y pesadas se encuentra en la granodiorita seguido de la diorita y por último el granito.
11. El análisis de los diagramas Proporciones de Tierras Raras y Variantes normalizadas a los valores MORB nos indica que la S.U. Yarabamba debe sus contenidos a la contaminación durante el engrosamiento de la corteza terrestre a fines del Cretáceo. Los contenidos de Sr y Rb nos indican una fuerte asimilación y diferenciación de los magmas en ambos grupos de intrusivos.
12. El análisis de los diagramas Multielementales nos muestra un enriquecimiento de los elementos LILE (<100) y un empobrecimiento de elementos HFSE menor de 10, anomalías negativas de Nb y anomalías positivas de Th, Ce, que nos indica que ambos Grupos

de Intrusivos están relacionados a un marco tectónico de subducción de placas.

13. El análisis de los diagramas de Metales de Transición normalizados a valores de Sun, en la Superunidad Yarabamba presenta una mayor concentración Mn, Fe, Co, Cu y Zn y la Superunidad Challaviento Ti, V, Ni.
14. La profundidad de la fuente magmática en la Superunidad Yarabamba alcanzó 60 km y la Superunidad Challaviento 40 km.
15. Con respecto al ambiente tectónico ambas Superunidades caen dentro del campo de granitoides de tipo "I" y "S" y ambas pertenecen al ambiente de los granitoides de arco volcánico.

VIII. AGRADECIMIENTOS

Deseamos agradecer a las Autoridades de INGEMMET por su colaboración en proporcionar la data geoquímica y los planos de ubicación del muestreo, además a las Autoridades del Vicerrectorado de Investigación y de nuestra Facultad por su apoyo.

IX. BIBLIOGRAFÍA

1. Acosta, H.; Alván A.; Mamani M.; Oviedo M; Rodríguez, J. (2011). *Geología de los Cuadrángulos de Pachia y Palca*. Escala 1:50000. Boletín N.º 139. Serie A Carta Geológica Nacional. INGEMMET. 100 pp.
2. Cobbing E, Pitcher, W (1983). Andean plutonism in Peru and its relationship volcanism and metallogenesis at a segmented plate edge. *Geological Society of America. Memoir* vol 159, pp 277-291.
3. Martínez, W, Cervantes, J (2003). *Rocas Ígneas en el sur del Perú; Nuevos datos geocronométricos, geoquímicos y estructurales entre los paralelos 16 y 18.30 latitud sur*. Boletín N.º 26 Serie D Estudios Regionales INGEMMET.
4. Pearce J.A (1983). *Role of the sub- continental lithosphere in magma genesis at active continental margins*. In Hawkesworth C.J. and Norry M.J. (eds.) *Continental basalts and mantle xenoliths*. Shiva; Nantwich, pp 32, 230-249.
5. Pitcher, W, Atherton MP, Cobbing EJ, Beckinsale, R.I (1985). *Magmatism at a plate edge: The Peruvian Andes*. Glasgow: Blackie, 329 p
6. Rollinson, H (1993). *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. Longman Scientific Technical and John Wiley & Sons. New York.
7. Steward, J (1968). *Rocas Intrusivas del Cuadrángulo de La Joya*. Incluido en el Boletín N.º 19 García, W: Geología de los Cuadrángulos de Mollendo y la Joya. Servicio de Geología y Minería.
8. Wilson, J; Garcia, W (1962): *Geología de los cuadrángulos de Pachia y Palca*. Boletín No. 4 Serie A Comisión Carta Geológica Nacional (INGEMMET) 81pp