

Caracterización litogeoquímica de los batolitos de Las Lomas y Noque en el departamento de Piura y su comparación con los batolitos de la Cordillera Blanca y Challaviento

Lithogeochemical characterization to the Las Lomas y Noque Batholiths in the Piura Department and his comparison with Cordillera Blanca and Challaviento Batholiths.

Hugo Rivera¹, Jorge Chira¹, Néstor Chacón¹, Víctor Gonzales M.², Jorge Gonzales CH.²

RECIBIDO: 11/05/2015 - APROBADO: 29/05/2015

RESUMEN

Las variedades litológicas predominantes de los dos batolitos son tonalita y granodiorita, provenientes de magmas félsicos. La relación SiO₂ vs. Sm/Yb permite determinar que ambos son de la misma edad. Las rocas son de naturaleza subalcalina de las series calcoalcalinas de medio y alto potasio, con un carácter metaluminoso.

Los diagramas de discriminación tectomagmática indican que son granitos de arco volcánico. Los elementos traza y tierras raras también muestran características típicas de rocas asociadas a subducción. La profundidad de la fuente magmática es menor de 20 km y la ausencia de granate indica que no hay contaminación mantélica. Ambos provienen de magmas húmedos, el batolito Las Lomas es del tipo "I" y de la serie de la magnetita, asociado a elementos calcófilos y a la mineralización de Cu-Mo, el batolito Noque del tipo "S" y de la serie de la Ilmenita, asociado a elementos litófilos, y no cae en ningún campo de mineralización específica.

Comparando a los batolitos, los del norte son calcoalcalinos de medio K, los del centro y sur son calcoalcalinos de alto K, presencia de granate en el centro y sur, y todos los granitoides son de naturaleza de arco volcánico. Los batolitos del norte caen en el campo de los anorogénicos y los del centro y sur de los campos de tipo "I" y "S". Los granitos del norte la profundidad de su fuente magmática alcanza menos de 20 km, la Cordillera Blanca 60 km y Challaviento 40 km. Las edades varían desde las más antiguas Las Lomas, Noque, Challaviento y la más joven la Cordillera Blanca coincidiendo con las dataciones radiométricas.

Palabras clave: Geoquímica magmática, tectomagmático, elementos mayores, traza, tierras raras.

ABSTRACT

The predominant lithological varieties of the two Batholiths are tonalite, granodiorite from felsic magmas. The SiO₂ vs. Sm / Yb to determine that both are of the same age. The rocks are nature of subalkaline and calc-alkaline series of medium and high potassium with metaluminous character.

Tectonomagmatic diagrams indicate that they are of volcanic arc granites. Trace elements and rare earth rocks also they show typical features associated with subduction. The depth of the magma source is less than 20 km and the absence of garnet mantle indicate no contamination mantle. Both come from wet magmas, the batholith Las Lomas is of the type "I" and the of magnetite series, associated with chalcophile elements and Cu-Mo mineralization, the Batholith Noque type "S" and the ilmenite series associated lithophile elements, and does not fall into any specific field of mineralization.

¹ Docentes de la Escuela de Ingeniería Geológica. Universidad Nacional Mayor de San Marco. Email: hrivram@unmsm.edu.pe

² Alumnos de la Escuela de Ingeniería Geológica. Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Comparing the batholith, the North are medium-K, calc-alkaline, the center and south are high-K calc-alkaline, the presence of garnet in the center and south, and all are nature of volcanic arc granitoids. North Batholiths fall into the field of anorogenic and the central and southern batholiths of type "I" and "S". North granites depth of its source magma reaches less than 20 kilometers, the Cordillera Blanca Challaviento 60 Km and 40Km. The ages range from the oldest Las Lomas, Noque, Challaviento and the younger the Cordillera Blanca coinciding with radiometric dating.

Keywords: magmatic geochemistry, tectomagmatic, major, trace elements, REE.

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 los batolitos de Las Lomas y Noque en el departamento de Piura.

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 ambientes geotectónicos, sus diferenciación química y su relación con la mineralización de la región.

Una vez determinada su caracterización geoquímica se hará luego la comparación geoquímica con el batolito de la Cordillera Blanca en Áncash (Rivera, H. et al, 2014) y el batolito de Challaviento en Tacna (Rivera, H. et al, 2013).

I.1 Área de estudio

El área de estudio se encuentra entre los paralelos 4° y 4°30' latitud sur, comprendido en el departamento de Piura (Figuras N° 1 y N° 2). En esta área INGEMMET colectó 9 muestras de rocas intrusivas perteneciente al batolito de Noque y 8 muestras del batolito de Las Lomas. Fueron analizadas todas ellas por el método ICP incluyendo los óxidos mayores (08), menores (03) y trazas (35). La presente investigación se lleva a cabo con el doble fin de caracterizar geoquímicamente y efectuar el análisis correlacional de los batolitos a investigar.

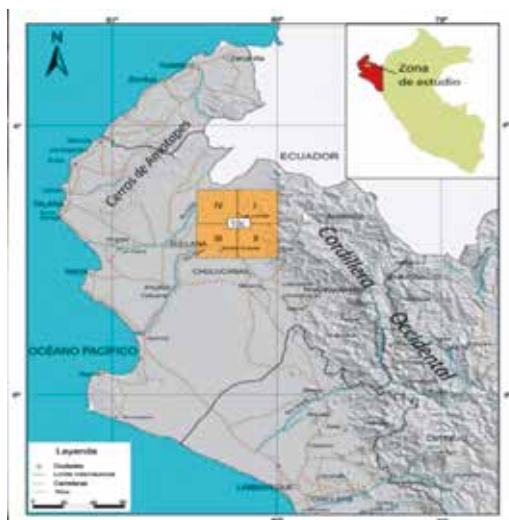


Figura N° 1. Mapa de ubicación del área de estudio en el cuadrángulo de Las Lomas (Tomado de Jaimes, F. et al, 2012).

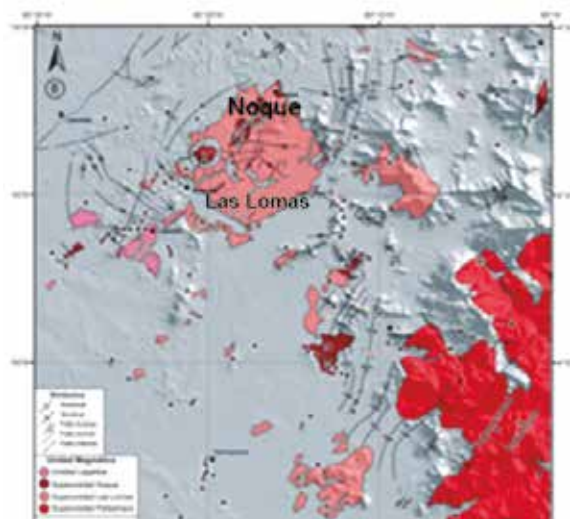


Figura N° 2. Mapa de ubicación de las principales unidades magmáticas del cuadrángulo de Las Lomas (Tomado de Jaimes, F. et al, 2012).

II. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1 Geología regional

2.1.1 Superunidad Las Lomas

La denominación de superunidad se asigna al conjunto de rocas plutónicas que se exponen principalmente en los alrededores del distrito de Las Lomas y en las cercanías del poblado de Malingas, en ambos casos parecen tener característica de complejos anulares (Reyes y Caldas, 1987) como los complejos plutónicos del norte de Lima (Cobbing y Pitcher, 1972).

La característica litológica de esta superunidad es la presencia de gabros y dioritas en las partes marginales, que se encuentran intruidas por granodioritas, granitos y monzogranitos, estos últimos exhumados en la parte central de la cuenca Lancones (Figura N° 2).

Ladatación radiométrica $^{40}\text{Ar}/\text{Ar}^{39}$ sobre hornblenda del monzogranito reporta una edad de 70.8 ± 1.9 Ma (Winter, 2008).

2.1.2 Superunidad Noque

Está constituida por pequeños cuerpos que se encuentran distribuidos en todo el cuadrángulo de Las Lomas, (Figura N°2), principalmente al oeste de Carrizalillo, al sur de Suyo y entre La Bocana y Noque y presentan una dirección NO-SE, similar a las otras unidades. La superunidad Noque fue definida según sus características geoquímicas complementadas con las relaciones de campo. Los principales componentes de esta superunidad son: tonalita,

gabrodiorita, granodiorita y granito. Estos cuerpos intruyen a secuencias volcánicas e intrusivas de edad cretácica.

No se dispone de dataciones radiométricas de esta superunidad, por lo que su edad puede ser considerada dentro del intervalo de 70.8 ± 1.9 Ma. a 48.06 ± 5.81 Ma. (Cretáceo superior-Paleógeno) (Jaimes et al., 2012).

2.1.3 Superunidad Challaviento

Wilson y García (1962) establecen que los intrusivos más importantes son los batolitos de granodiorita mapeada (en los cuadrángulos de Pachia y Palca) como granodiorita Toquepala – Challaviento. En los intrusivos granodioríticos 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 le asignaron una edad del Terciario inferior.

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.

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

2.1.4 Batolito Cordillera Blanca

El batolito de la Cordillera Blanca es un complejo plutónico que aflora ampliamente y se ubica en la parte central de la Cordillera Occidental y tiene un rumbo aproximadamente paralelo a las estructuras principales de la región.

El afloramiento del batolito tiene aproximadamente 200 km de largo, el ancho es de 12 a 15 km, aunque la distribución de las apófisis relacionadas indica que el complejo intrusivo abarca un ancho de 30-35 km.

Se puede apreciar algunos de los tipos de rocas que constituyen el complejo plutónico y sus relaciones generales (Wilson et al., 1967). La gran masa del batolito consiste de una granodiorita leucócrata de grano grueso, que en algunas áreas muestra una foliación bien desarrollada. En ciertos sectores la granodiorita pasa gradualmente a una anfíbolita producida por la contaminación del magma con el material derivado de la formación Chicama. En algunos casos se nota todavía la forma de los xenolitos digeridos, mientras que en otros se encuentra anfíbolita homogénea y uniforme. Aunque es común mostrar anfíbolita en muchas partes del batolito, generalmente no es cuantitativamente importante. Sin embargo, hay afloramientos relativamente extensos en las cabeceras de la quebrada Llanganuco y cerca del paso del mismo nombre.

Las edades obtenidas en el batolito de la Cordillera Blanca (Cobbing et al., 1996) varían de 4.6 a 16 MA determinadas por el método K/Ar sobre biotitas; sin embargo, (Pitcher et al., 1985) han obtenido una edad de U-Pb de 9 -12 MA, que indica una edad de Mioceno medio a superior.

2.2 Análisis y clasificación geoquímica

2.2.1 Diagramas de Harker

En las concentraciones de elementos mayoritarios o mayores entre estos dos grupos de rocas intrusivas, hay un ligero predominio en abundancia promedio en el batolito Noque en TiO_2 , Fe_2O_3 , FeO , MnO , MgO , K_2O y P_2O_5 y en el batolito Las Lomas en SiO_2 , Al_2O_3 , CaO .

Las sumas de óxidos nos indican que los valores de alcalinotérreos y los álcalis son mayores en el batolito Las Lomas y en el batolito Noque son mayores en la suma de hierro. Estos rangos de variación sugieren un grado de evolución por cristalización fraccionada de minerales ferromagnesianos y plagioclasas cálcica. Las correlaciones negativas entre el SiO_2 y P_2O_5 y TiO_2 corroboran también la evolución por cristalización fraccionada en ambos grupos de intrusivos.

Ambos batolitos muestran un fraccionamiento de K y Na en el tiempo, enriqueciéndose ligeramente en estos álcalis con el incremento de la sílice, mientras que los demás óxidos disminuyen con el incremento de la sílice.

2.2.2 Diagrama sílice vs. álcalis total - TAS

El batolito de Noque según el diagrama TAS (Figura N° 3) muestra una diferenciación magmática que abarca mayormente el campo de los granodioritas (62%), seguido de una serie de naturaleza tonalítica (38%). En líneas generales, está constituida en su totalidad de rocas félsicas.

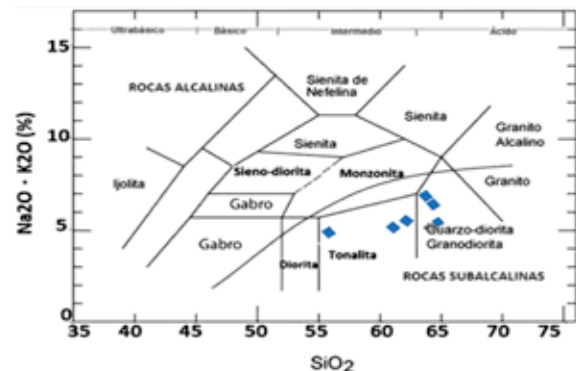


Figura N° 3. Diagramas TAS y de Irvine-Baragar del batolito Noque.

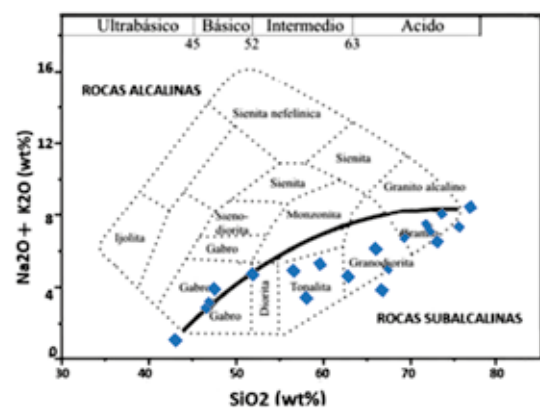


Figura N° 4. Diagrama TAS y de Irvine-Baragar del batolito de Las Lomas.

El batolito de Las Lomas (Figura N°4) muestra una diferenciación magmática que abarca mayormente el campo de los granitos normales (36%), seguido de una serie de rocas de naturaleza granodiorita (21%), gabros (21%), tonalitas (15%), y en menor proporción rocas dioríticas (7%). En líneas generales está constituida de una diferenciación magmática más evolucionada y de mayor proporción de rocas félsicas que las rocas del batolito Noque.

2.2.3 Diagrama de Irvine-Baragar: SiO₂ vs. K₂O+NA₂O

La subdivisión de las rocas intrusivas en dos tipos de rocas alcalinas y subalcalinas (toleíticas) sobre el diagrama de sílice vs. álcalis, de acuerdo al diagrama de Irvine-Baragar, como se muestra en las figuras N° 3 y N° 4.

Las rocas del batolito Noque, de acuerdo a este diagrama (Figura N° 3), corresponden en su totalidad a la serie subalcalina.

Las rocas del batolito Las Lomas (Figura N° 4) corresponden mayormente a la serie subalcalina, se diferencian de las rocas del batolito Noque, debido a la presencia de mayor abundancia de granitos con ortosa rosada.

2.2.4 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 de milicaciones. Aunque el diagrama R1-R2 es poco popular debido a los límites curvilíneos de los campos y a los parámetros R1 y R2 que no tienen ningún significado inmediato, se le considera como muy útil y preciso ya que para introducir los análisis en el diagrama se utilizan ocho variables (elementos mayores) como parámetros. Esto es importante, pues involucra mayor cantidad de elementos al usar en el diagrama, arrojando una clasificación más precisa y robusta. Los autores de este diagrama aseguran que este es más sencillo en su utilización que un diagrama de la norma CIPW. Los parámetros R1 y R2 se obtienen de las siguientes fórmulas:

$$R1 = 4Si - 11(Na + K) - 2(Fe + Ti);$$

$$R2 = 6Ca + 2Mg + Al$$

Donde Fe involucra la suma del hierro ferroso y hierro férrico.

En el batolito Noque, de acuerdo al diagrama R1-R2 (Figura N° 5), las muestras caen en los campos de las granodioritas y tonalitas, por lo tanto todas las rocas de este batolito son de naturaleza félsica.

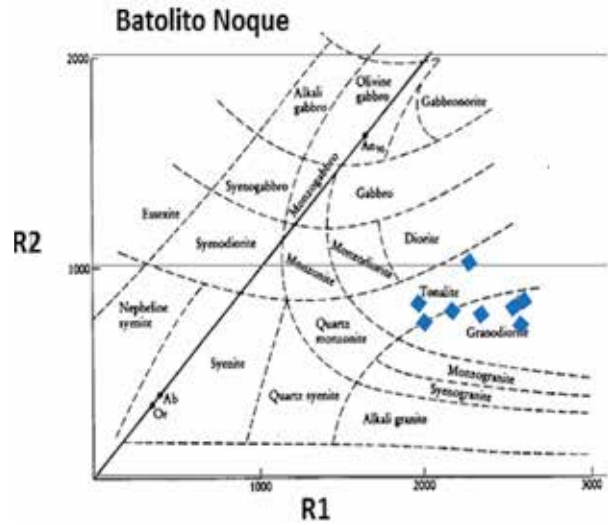


Figura N° 5. Clasificación de milicaciones R1-R2 para el batolito Noque.

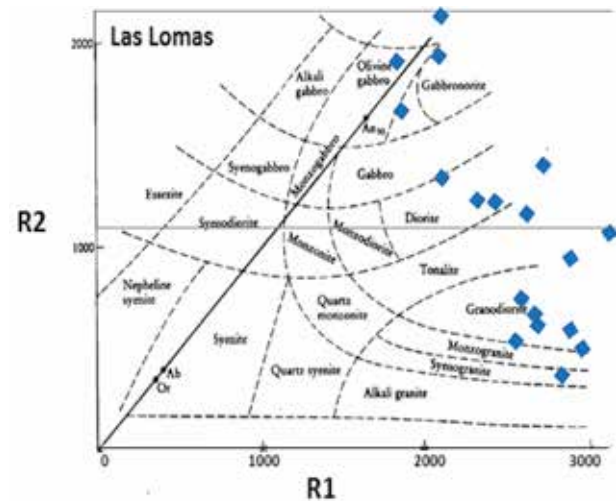


Figura N° 6. Clasificación de milicaciones R1-R2 (De la Roche *et al.*, 1980) para el batolito Las Lomas.

El batolito Las Lomas, de acuerdo al mismo diagrama (Figura N° 6), cae en los campos del sienogranito, granodiorita en mayor proporción; y algunas muestras caen en el campo de la tonalita, diorita y gabro en menor proporción. En líneas generales se puede considerar que las rocas de este batolito son de naturaleza félsica, diferenciándose de las rocas del batolito Noque debido a que muestra una gran variedad petrográfica.

2.2.5 Diagrama de Ringwood: SiO₂ vs. K₂O

La subdivisión de las rocas subalcalinas se dividen usando el diagrama de Ringwood: sílice vs. K₂O en rocas de la serie calcoalcalina de bajo, medio y alto contenido de potasio (K).

Con respecto al diagrama de SiO₂ vs. K₂O de Ringwood (1989) y Le Maitre (1989) (Figura N° 7) del batolito Noque, la clasificación geoquímica de las rocas subalcalinas caen en el campo de la serie calco-alcalina de medio potasio, una mayor proporción, y una muestra cae en el campo de bajo contenido de potasio o serie toleítica.

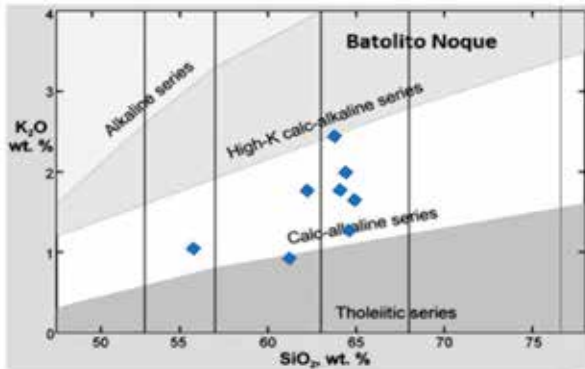


Figura N° 7. Clasificación de las rocas subalcalinas del batolito Noque.

Con respecto al diagrama de SiO₂ vs. K₂O (Figura N° 8) del batolito Las Lomas, la clasificación geoquímica de las rocas subalcalinas corresponde a la serie calco-alcalina de medio potasio y en su mayor proporción cae en el campo de la serie toleítica de bajo K.

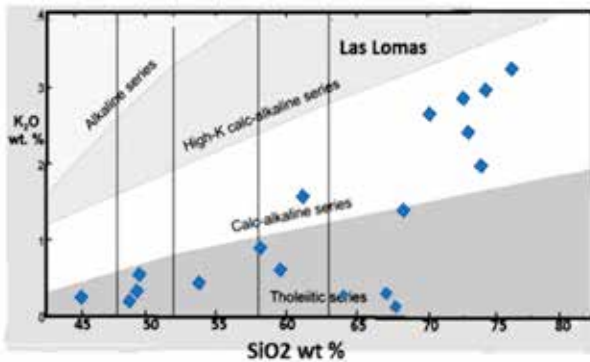


Figura N° 8. Clasificación de las rocas subalcalinas del batolito Las Lomas

2.2.6 Saturación de Alúmina

Las rocas intrusivas de acuerdo a la clasificación de Shand (Figura N° 9) se clasifican en:

Peraluminosa: $Al_2O_3 > CaO + Na_2O + K_2O$;

Metaluminosa: $Na_2O + K_2O < Al_2O_3 < CaO + Na_2O + K_2O$ y

Peralcalina: $CaO + Na_2O + K_2O > Al_2O_3 < Na_2O + K_2O$

La Figura N° 9 muestra que en el batolito Las Lomas el total de las muestras son de saturación metaluminosa.

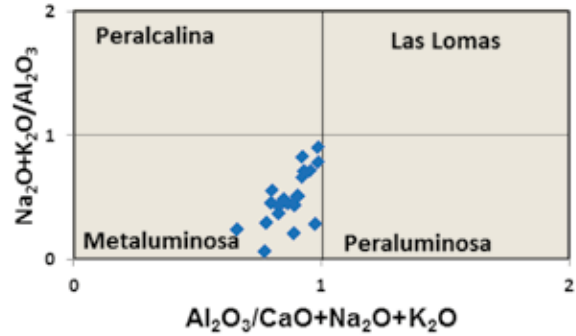


Figura N° 9. Saturación de alúmina del batolito Las Lomas.

Las rocas del batolito Noque varían entre saturación metaluminosa y peralcalina, diferenciándose por ello del batolito Las Lomas (Figura N° 10), debido a una deficiencia de aluminio, en tanto que el Na y K están en exceso de lo necesario para formar feldespatos.

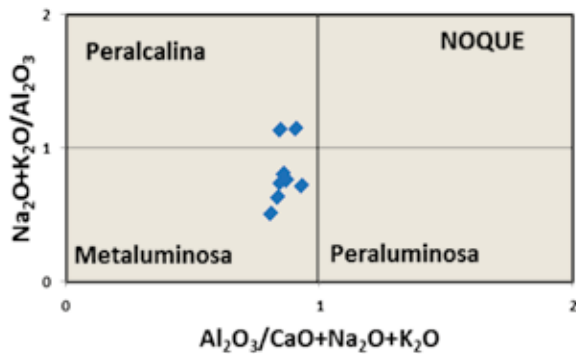


Figura N° 10. Saturación de alúmina batolito Noque.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.3 Diagramas de tierras raras

3.3.1 Diagrama de tierras raras normalizadas

Los promedios de abundancia de tierras raras de ambos batolitos fueron normalizados de acuerdo al índice de los condritos de Wakita, con el fin de evitar el efecto Oddo-Harkins (los elementos de número atómico par son más abundantes que los contiguos de número atómico impar). Se normalizan las abundancias de las tierras raras en las rocas a las que presentan en las condritas (meteoritos). En la literatura se dan varios valores de las abundancias de tierras raras en condritas de acuerdo a diversos autores.

Los análisis correlacionales de los espectros entre las tierras raras ligeras/tierras raras pesadas- LREE/HREE (por sus siglas en inglés) (Figura N° 11) indican lo siguiente:

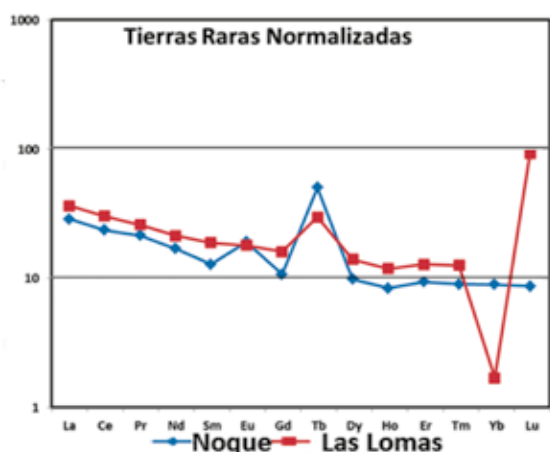


Figura N° 11: Tierras raras normalizadas de los batolitos Noque y Las Lomas.

Hay un enriquecimiento en tierras raras ligera-LREE- y pesadas HREE en todo el espectro sobre el intervalo 10 y un empobrecimiento en Yb por debajo del intervalo 10 en el batolito Las Lomas, con excepción de un enriquecimiento de Lu. La presencia de granate en la fuente no es muy clara, por este enriquecimiento de HREE por encima del intervalo 10 en el batolito Las Lomas podría indicar su ausencia. La abundancia de tierras raras es mayor en comparación con el batolito Noque.

La ligera anomalía positiva del Eu con respecto al Sm y al Gd en el espectro normalizado de REE del batolito Noque se estima como indicadora de alta proporción. No hubo separación de las plagioclasas por cristalización fraccionada de la roca fuente, mientras que en el batolito Las Lomas no es evidente esta anomalía, por lo que se estima que no hubo dicho fraccionamiento.

3.1.2 Variación litológica de tierras raras

Con respecto a la concentración de las tierras raras, de acuerdo a las litologías (Figura N° 12) que predominan en el batolito Noque, se observa que las granodioritas tienen una ligera mayor concentración de TR ligera y pesada, seguida de la tonalita, pero todas ellas con abundancias

superiores al intervalo 10 y ambas están empobrecidas del elemento lutecio.

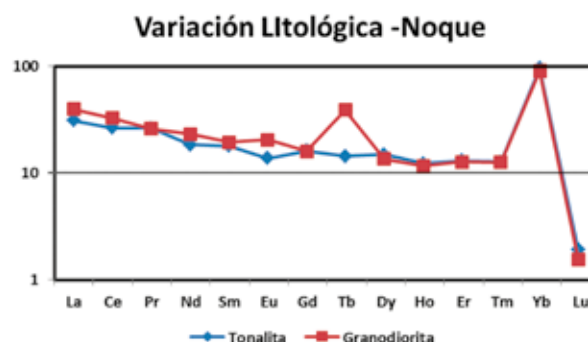


Figura N° 12. Variación litológica de tierras raras en el batolito Noque.

En la tonalita se presenta una ligera anomalía negativa de Eu, lo que indica que hubo poco fraccionamiento de las plagioclasas y en las granodioritas presenta anomalía positiva de Eu que indica ningún fraccionamiento de las plagioclasas. Además el enriquecimiento de las tierras raras pesadas sobre el intervalo 10 en ambos batolitos nos indica la no presencia de granate en la fuente y la presencia de anomalías positivas de Tb e Yb y escasa abundancia de Lu.

Con respecto a la concentración de las tierras raras de acuerdo a las litologías (Figura N° 13) que predominan en el batolito Las Lomas, se observa que los granitos tienen mayor concentración de TR ligera y pesadas, seguida por las tonalitas y las granodioritas, todas ellas con abundancias superiores al intervalo 10 y luego seguidas por los gabros y dioritas en baja proporción por debajo del intervalo 10. Las rocas básicas e intermedias presentan un ligero empobrecimiento de tierras raras pesadas por debajo del intervalo 10. No se presenta en ninguna de las litologías la anomalía negativa de Eu, lo que indica que no hubo ningún fraccionamiento de las plagioclasas. Además presentan todas anomalías positivas de Tb e Yb y escasa abundancia de Lu en todas las litologías, similar al de batolito Noque.

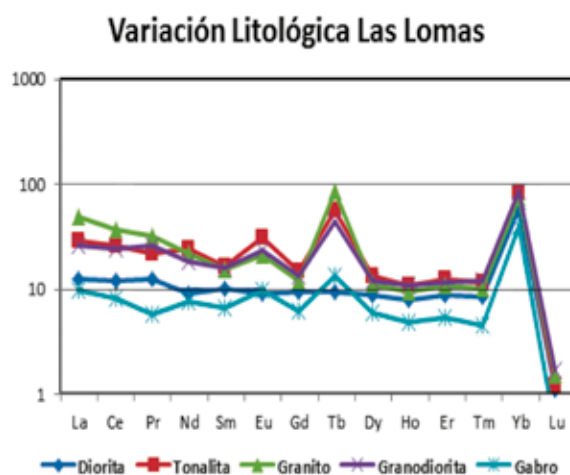


Figura N° 13. Variación litológica de tierras raras en el batolito Las Lomas

3.1.3 Diagramas multielementales

Los diagramas multielementales normalizados están basados sobre un grupo de elementos incompatibles con respecto a la mineralogía del manto. Ellos son una extensión de los tradicionales diagramas de REE normalizados a las condritas que son más familiares.

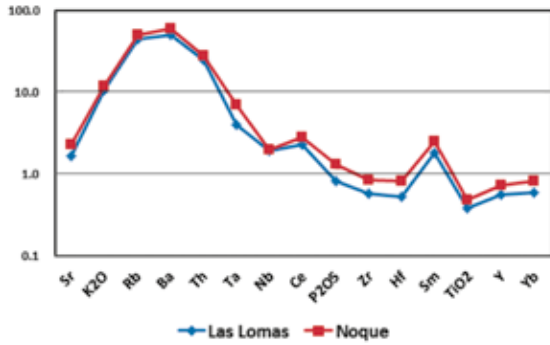


Figura N° 14. Diagrama multielemental batolitos Las Lomas y Noque.

La Figura N° 14 es un diagrama spider multielemental que 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 batolitos están relacionados a un marco tectónico de subducción de placas.

3.1.4 Diagramas de elementos de transición

Los elementos de la primera serie de transición (Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu y Zn) varían en el estado de valencia y propiedades geoquímicas. El Ti cuadrivalente es un elemento incompatible de alta valencia mientras los elementos divalentes Mn, Co, Ni, Cu y Zn y los trivalentes V y Cr son elementos compatibles. El ploteo de los elementos de transición ha sido principalmente usado con basaltos como medio de exploración de las propiedades geoquímicas de las primeras series de transición. No hay una razón geoquímica para que ellos se comporten como un grupo coherente, ni hay ninguna razón por la que deberían haber estado presentes en la primitiva Tierra en concentraciones condriticas.

En líneas generales, con respecto a este diagrama de metales de transición en dispersión primaria (Figura N°15), el batolito Noque presenta una ligera mayor concentración de todos los elementos comparados con el batolito Las Lomas.

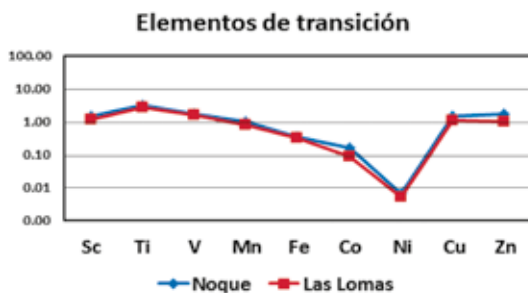


Figura N° 15. Abundancia de elementos de transición normalizados de los batolitos Noque y Las Lomas.

3.1.5 Diagramas discriminantes de ambientes tectónicos

3.1.5.1 Diagrama de Shand

Este diagrama sirve para clasificar el ambiente tectónico en el que se genera un granitoide. Figura N° 16.

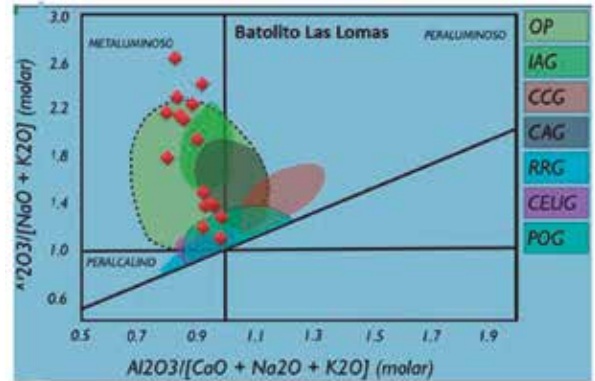


Figura N° 16. Diagrama de Shand discriminante de ambientes tectónicos del batolito Las Lomas. Los resultados de las figuras N°16 y 18 los intrusivos del batolito Las Lomas caen mayormente en el campo metaluminoso y en sus valores promedios pertenecen a los plagiogranitos oceánicos (OP).

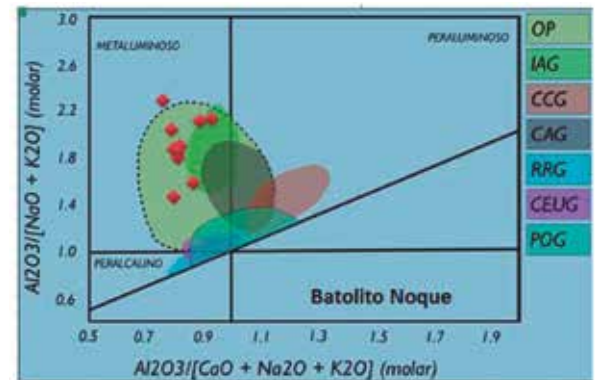


Figura N° 17. Diagrama de Shand discriminante de ambientes tectónicos del Batolito Noque.

En las Figuras N° 17 y N° 18 los intrusivos del batolito Noque inciden mayormente en el campo metaluminoso y sus promedios pertenecen también a los plagiogranitos oceánicos (OP).

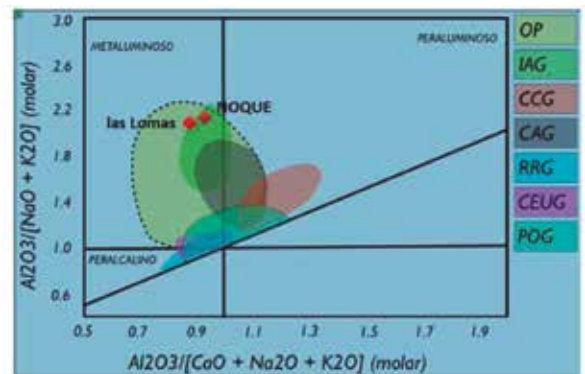


Figura N° 18. Diagrama de Shand discriminante de ambientes tectónicos de los batolitos Las Lomas y Noque.

3.1.5.2 Diagrama de Whalen

En el diagrama de Whalen et al. (1987) de la Figura N° 19, donde se grafican los valores de Y (ppm) versus los valores de la relación $(Ga/Al) \cdot 10,000$. Cabe anotar que los valores del Al en ppm se obtiene del Al_2O_3 dados en porcentaje de peso.

Este diagrama es un indicador geotectónico aplicado a los batolitos de Noque y Las Lomas. Dicho diagrama muestra dos campos separados: uno correspondiente a los granitos del tipo I y S y el otro al de los granitos tipo A, dando como resultados que ambos batolitos caen en el campo de los granitos anorogénicos (Tipo A).

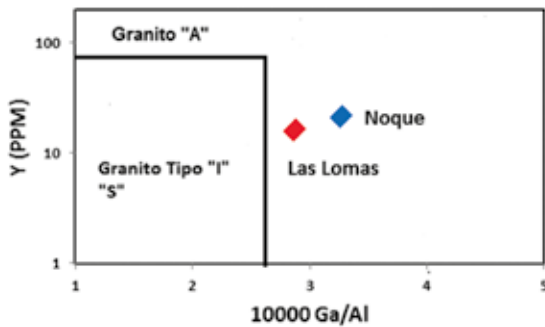


Figura N° 19. Diagrama discriminatorio tectónico de los batolitos Noque y Las Lomas.

Se denominaron **tipo A** debido a su alcalinidad, características anhidras y presunción de ambientes tectónicos anorogénicos. Algunos consideran que este tipo de granitoides están relacionados a una forma de extensión continental.

3.1.5.3 Diagrama de Pearce: (Y+Nb) vs. Rb

Los intrusivos del batolito Noque y Las Lomas (Figura N° 20). Sus promedios de abundancia de estos elementos caen en el campo de granitos de arco volcánico, diferenciándose del batolito Noque por su mayor abundancia de Y+Nb y Rb.

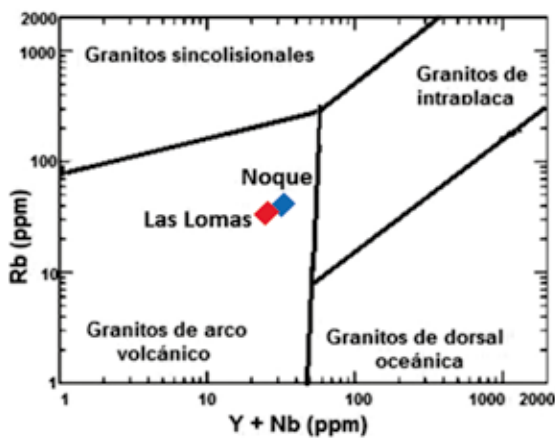


Figura N° 20. Diagrama de Pearce Y+Nb vs. Rb para los batolitos Noque y Las Lomas.

3.1.5.4 Diagrama de Pearce: (Y+Nb) vs. Nb

El batolito Noque y Las Lomas (Figura N° 21). Los promedios de abundancia de las rocas de ambos batolitos caen en el campo de los granitos de arco volcánico. Similares coincidencias de ambientes tectónicos fueron encontrados en el diagrama Y+Nb vs. Rb (Figura N° 20).

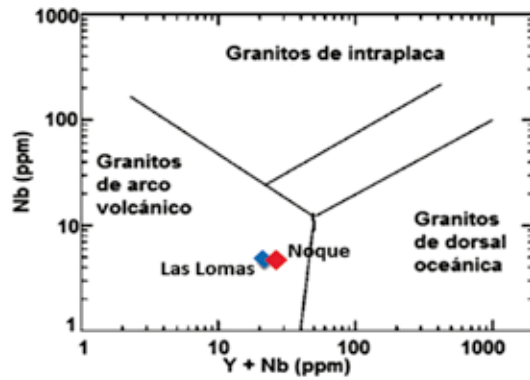


Figura N° 21. Diagrama de Pearce Y+Nb vs. Nb para los batolitos Noque y Las Lomas.

3.1.6 Diagrama de Pearce: Y vs. Nb

Los promedios de abundancia de las rocas del batolito Las Lomas (Figura N° 22). Las rocas caen mayormente en el campo de los granitos de arco volcánico y granitos sin colisional.

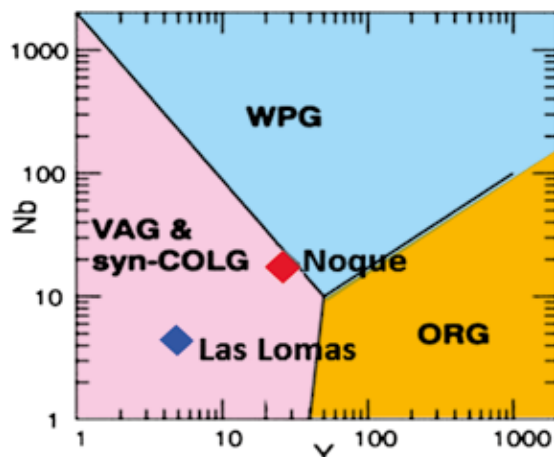


Figura N° 22. Diagrama de Pearce Y vs. Nb de los batolitos Noque y Las Lomas.

Mientras que el promedio de las rocas del batolito Noque (Figura N° 22) caen en el campo de los granitos de arco volcánico y granitos sin colisional, pero con cierta tendencia geológica al campo de los granitos intraplacas, similares ambientes tectónicos encontrados en el diagrama Y+Nb vs Rb (Figuras N° 20 y N° 21).

3.1.7 Diagrama de Pearce: Yb+Ta vs. Rb

Según Pearce, el diagrama Yb+Ta (ppm) versus Rb (ppm) nos muestran los diferentes ambientes tectónicos similares al anterior diagrama.

Las rocas del batolito Noque y Las Lomas (Figura N° 23) caen mayormente en el campo de los granitos de arco volcánico, similares ambientes tectónicos encontrados en el diagrama Y+Nb vs. Rb.

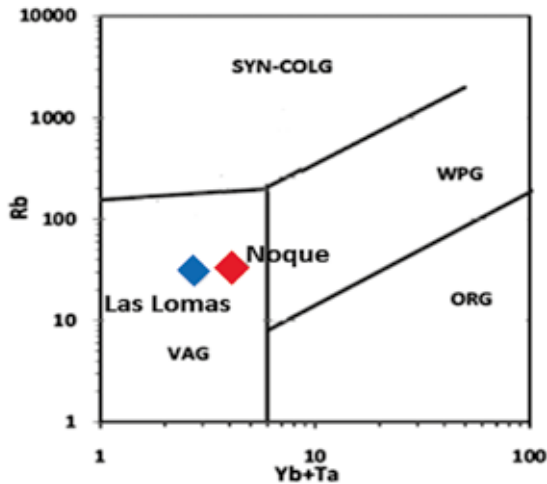


Figura N° 23: Diagrama de Pearce: Yb+Ta vs. Rb batolitos Noque y Las Lomas.

3.1.8 Profundidad de la fuente magmática: SiO₂ vs. Ce/Y

Para estimar la profundidad de las cámaras magmáticas donde se generan los magmas, se ploteó los datos del SiO₂ vs. Ce/Y de ambos batolitos en el diagrama propuesto por Mantle y Collins (2008), en donde se observa que los intrusivos de los batolitos de Las Lomas y Noque (Figura N° 24) se formaron dentro de una corteza con espesor algo mayor de 10 km, diferenciándose los intrusivos del batolito Las Lomas al tener algo mayor abundancia de la proporción Ce/Y.

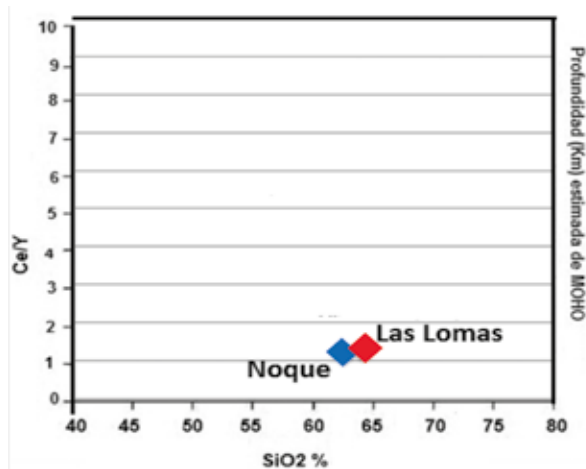


Figura N° 24. Diagrama de la fuente magmática de ambos batolitos.

3.1.9 Profundidad de los magmas: Eu/Eu* vs. Ce/Y

El diagrama Eu/Eu* vs. Ce/Y determina la profundidad estimada de asimilación del magma. Se usan estos elementos dado que el resto de las tierras raras son trivalentes, el Eu bivalente presenta un comportamiento diferencial produciendo anomalías que se miden por la razón Eu/Eu*.

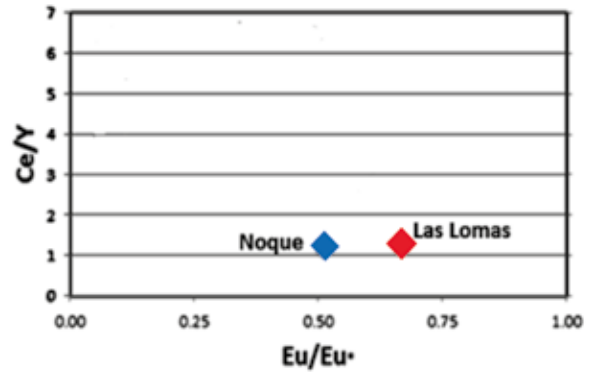


Figura N° 25. Diagrama de profundidad de las fuentes de los batolitos Noque y Las Lomas.

Las rocas del batolito Noque y Las Lomas tienen valores de Ce/Y mayor de 1, por lo tanto, estas rocas se formaron dentro de una corteza mayor de 10 km; es decir, tienen una profundidad de asimilación del magma mayor de 10 km aproximadamente (Figura N° 25). Similar profundidad se revela en la Figura N° 24.

3.1.10 Antigüedad de los magmas: SiO₂ vs. Sm/Yb

Se determinó que probablemente a mayor valor de Sm/Yb, los magmas son más recientes; mientras que a menor valor de Sm/Yb, las muestras son más antiguas (Figura N° 26).

El batolito Las Lomas y Noque al tener similares proporciones de valores de Sm/Yb son contemporáneos, coincidiendo con la edad Cretácea que se atribuye por dataciones relativas. El batolito Noque es algo más antigua.

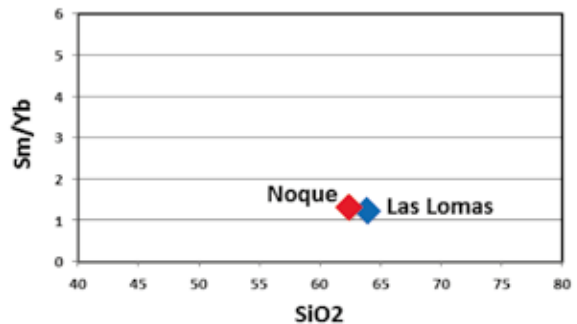


Figura N° 26. Diagrama para determinar la antigüedad de las rocas: SiO₂ vs. Sm/Yb.

3.1.1.1 Diagramas de fluidos hidrotermales y mineralización

3.1.1.1.1 Diagrama de circulación de fluidos hidrotermales: U vs. Th

Conociendo que los elementos radiactivos U, Th, incrementan sus concentraciones en la corteza superior, que a su vez también implica que ha habido una mayor contaminación cortical y una mayor circulación de fluidos hidrotermales y usando los valores promedios de las rocas intrusivas (Figura N° 27) de las unidades geológicas estudiadas, se determina que los intrusivos del batolito Las Lomas y Noque presentan valores de U bajos, debido a ello caen en el campo de los magmas de menor contaminación cortical y menor circulación de fluidos. El batolito Noque presenta valores algo mayores de U y en Th que el batolito Las Lomas.

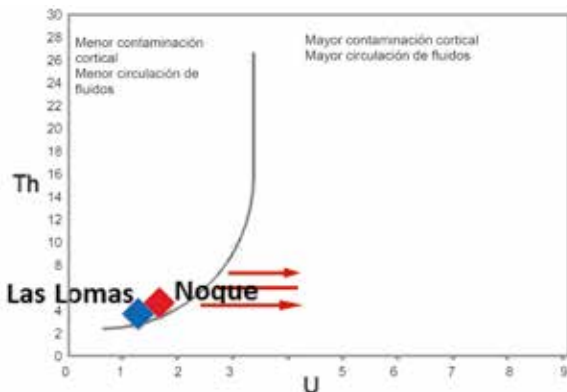


Figura N° 27. Diagrama de circulación de fluidos hidrotermales promedio de los batolitos Noque y Las Lomas.

3.1.1.1.2 Diagrama tipos de magmas secos o hidratados: Al/(Ca+Na+K) vs. Eu/Eu*

Según el diagrama de alúmina/álcalis vs. Eu/Eu* (Figura N° 28), calculado los valores de alúmina /álcalis en proporciones molares y el ratio Eu/Eu* cuyos valores se han normalizado de acuerdo a los valores según Wakita.

Los magmas de la composición de los dos batolitos de Las Lomas y Noque pertenecen a la zona metaluminosa; por

lo tanto, estos presentan ligero fraccionamiento de plagioclasas y si bien caen en el campo de los magmas húmedos, no generan fluidos hidrotermales y ni agentes transportadores de iones metálicos. El batolito Las Lomas muestra una mayor proporción de Eu/Eu*.

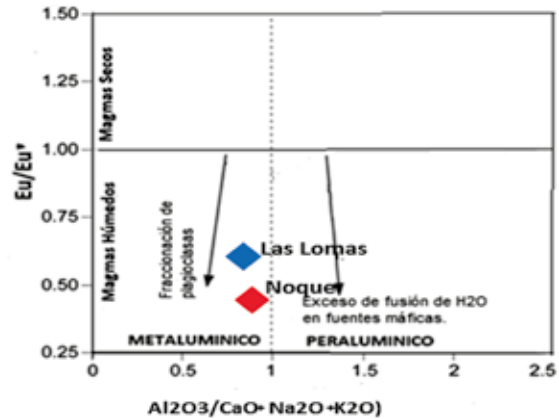


Figura N° 28. Diagrama de magmas húmedos y secos entre álcalis y Eu/Eu*

3.1.1.1.3 Diagrama estado de oxidación vs. el contenido agua: Eu/Eu* vs. Fe total

Las rocas de las dos unidades caen en el campo de la corteza continental y el batolito Noque cae dentro de los granitos tipo S o de la “serie de la ilmenita”. También están reducidos relativamente al incremento de la fugacidad de oxígeno, es decir, indican que son magmas húmedos. Además tienen predisponibilidad de estar asociadas a elementos litófilos. Se ubican en el trasarco continental.

El batolito Las Lomas cae dentro del campo de los granitos tipo I o de la serie magnetita. También están oxidados relativamente y con tendencia a magma seco y tienen predisponibilidad a elementos calcófilos. Se ubica en el arco continental/islas.

Con respecto a las ocurrencias mineralizadas el batolito Las Lomas cae en el campo del Cu-Mo y el batolito de Noque no cae en un campo específico de mineralización (Figura 29).

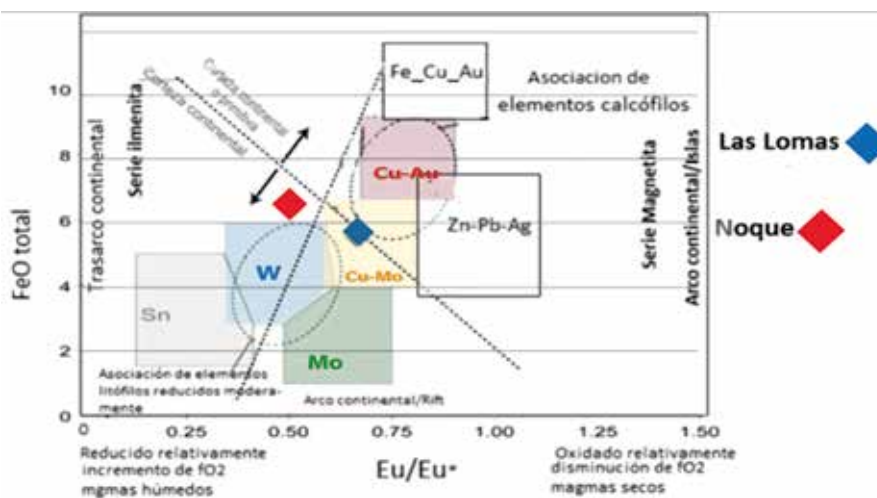


Figura N° 29: Diagrama de contenido de agua vs. oxidación y mineralización.

3.1.12 Comparación litogeoquímica de los batolitos

3.1.12.1 El magmatismo

Las edades radiométricas confirman la antigüedad magmática que se obtiene entre la relación SiO_2 vs. Sm/Yb (Figura N° 30). Los batolitos de menor relación Sm/Yb son más antiguos y los de mayor relación son los más jóvenes, confirmando que los batolitos del norte son más antiguos, seguido de Challaviento y el batolito Cordillera Blanca, el más joven, confirmado por las dataciones radiométricas.

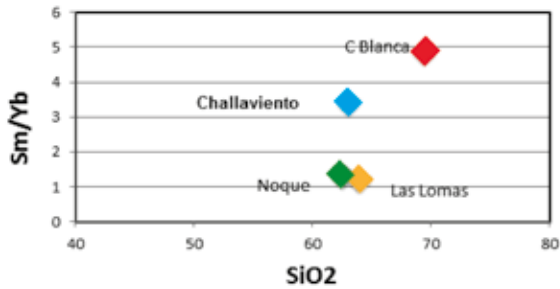


Figura N° 30. Antigüedad relativa de los batolitos.

3.1.12.2 Subducción placas de Nazca y Sudamericana

El magmatismo en los tres sectores del Perú (Figura N° 31), de acuerdo al ángulo de subducción de la placa de Nazca debajo de la Sudamericana, se compara de acuerdo a los indicadores geoquímicos, sus diferencias y concordancias.



Figura N° 31. Plano de ubicación de afloramientos de rocas intrusivas de los batolitos de Las Lomas, Noque, Cordillera Blanca y Challaviento.

Según Bernal y Tavera (2002), la distribución de los sismos en profundidad sugieren que la placa de Nazca subduce por debajo del borde oeste de Sudamérica de dos modos diferentes, conocidos como subducción subhorizontal y normal, tal como se muestra en el esquema de la Figura N° 32.

La subducción subhorizontal está presente en las regiones norte-centro y se caracteriza por que se inicia con un ángulo del orden de 25°-30°, hasta alcanzar una profundidad de 120 km en promedio, a partir de la cual la placa se desplazaría de manera horizontal hasta distancias de 750 km en la región norte y 500 km en la región centro, ambas desde la línea de fosa.

La subducción normal está presente en la región sur y aquí la placa de Nazca subduce con un ángulo de 30° de manera continua, hasta una profundidad de 250 km y una distancia de 450 km desde la línea de fosa. Entre ambos modos de subducción, se produciría la contorsión de la placa.

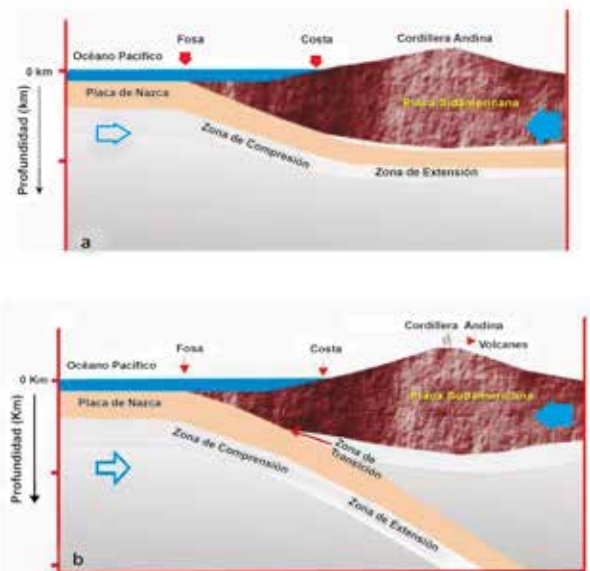


Figura N° 32. Esquema del modelo de subducción de la placa oceánica (Nazca) bajo la continental (Sudamericana). a) Región norte y centro, b) Región sur. Las flechas grandes indican la dirección de desplazamiento de las placas (Según Bernal y Tavera, 2002).

Desde el punto litogeoquímico, los batolitos del norte son calcoalcalinos de medio K, los del centro y sur son calcoalcalinos de alto K, el empobrecimiento de las tierras raras pesadas indican la presencia de granate en el centro y sur. Todos los granitos son de naturaleza de arco volcánico. Los batolitos del norte caen en el campo de los anorogénicos y los del centro y sur de los campos de tipo I y S. En los granitos del norte la profundidad de su fuente magmática alcanza menos de 20 km.

Comparando la ubicación espacial de los batolitos Las Lomas y Noque (norte) y Cordillera Blanca (centro) se les considera como de subducción subhorizontal (Figura N° 32 a) y Challaviento como de subducción normal (Figura N° 32 b).

Con relación a los resultados de la caracterización geoquímica de los intrusivos de las superunidades de Las Lomas y Noque con los batolitos de la Cordillera Blanca (Dpto. Áncash) (Rivera et al., 2014) y Challaviento (Tacna) (Rivera et al., 2013), estas unidades geológicas muestran un comportamiento geoquímico con respecto al ambiente geotectónico de subducción de placas y granitoides de arcos volcánicos. Con respecto a los batolitos de sur hay un empobrecimiento de tierras raras pesadas, lo que indica un origen mantélico rico en granates y presencia de fuerte anomalía negativa de Eu que indica un fraccionamiento de plagioclasas y las profundidades de la fuente magmática alcanza 40 km y en el centro alcanza 60 km de profundidad. Mientras, comparando con los batolitos de Las Lomas y Noque en el norte del Perú, que caen en los campos de granitos de tipo A anorogénicos, granito de arco volcánico y pertenecen a los plagiogranitos oceánicos y la ausencia de anomalías de Eu, carente de granate, y profundidades menores de 20 km, por lo que se confirma que el ángulo de subducción de la placa oceánica no ha alcanzado profundidades cercanas al manto como en el sur.

3.1.13 Resultados y análisis

El presente trabajo de investigación tuvo como finalidad conocer el comportamiento de los elementos mayores, menores y trazas, además de los compuestos químicos expresados en óxidos, contenidos en muestras de rocas intrusivas pertenecientes a los batolitos de Las Lomas y Noque, ubicados en el norte del Perú

Este estudio geoquímico de las rocas es complementario al estudio petrográfico microscópico, porque este muchas veces es incompleto, dado que la mayoría de los minerales admiten considerables sustituciones de otros elementos compatibles por su radio iónico o carga eléctrica. Por ello, resulta que podemos encontrar rocas de igual composición mineralógica pero con una distinta composición química.

Se intentó a través del comportamiento de los elementos mayores, traza y tierras raras confirmar o descartar el origen, la evolución y clasificación del magmatismo, así como sus relaciones con respecto a la inclinación de la placa de Nazca y comparar las caracterizaciones geoquímicas para ver las relaciones y diferencias de estas cuatro unidades geológicas.

IV. CONCLUSIONES

1. La caracterización geoquímica de las superunidades de Las Lomas y Noque indica que todas estas unidades geológicas provienen de fuentes magmáticas relacionadas a un marco tectónico de subducción de placas, como lo confirman los diagramas spider multielementales con las anomalías negativas de Nb y anomalías positivas de Th y Ce en las dos unidades geológicas. De acuerdo al diagrama de Ga/Al vs. Y nos muestra que las dos unidades geológicas son de naturaleza de los granitoides del tipo A anorogénicos. Según el diagrama (Y+Nb) vs. Rb, las unidades caen en el campo de los granitos de arco volcánico, coincidente con los diagramas (Y+Nb) vs. Nb, Y vs. Nb y (Yb+Ta) vs. Rb.

El diagrama de $Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$ vs. $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)$ nos muestra que las superunidades de Las Lomas y Noque pertenecen a los granitoides plagiogranitos oceánicos.

2. La circulación de fluidos hidrotermales relacionadas a la mineralización en el norte del Perú, en el ambiente de la subducción de placas, determinada por el diagrama de U vs. Th nos muestran que los valores en las superunidades Las Lomas y Noque presentan una menor contaminación cortical debido a una menor circulación de fluidos. Asimismo, el diagrama Eu/Eu* vs. (Al/Ca+Na+K) nos indica que los magmas que dieron origen a estas unidades geológicas son de naturaleza húmeda y estas unidades son de carácter metaluminosa. La comparación del grado de oxidación dado por la abundancia del Fe_2O_3 total nos indica que la superunidad Noque ha sufrido mayor oxidación en la etapa de cristalización o por efectos posteriores, seguido de la superunidad Las Lomas con menor oxidación. La relación geoquímica con respecto a la mineralización fue determinada por el diagrama Eu/Eu* vs. FeO, que nos muestra que el batolito Las Lomas pertenece a la serie de la magnetita, es decir son granitos tipo I y que mayormente están asociados a los elementos calcófilos (Cu-Mo-Au-Zn-Pb-Ag), con excepción del batolito Noque, que está asociado a elementos litófilos (W, Sn) o series de la ilmenita o granito tipo S y no tiene relación con una mineralización específica.
3. Los análisis composicionales determinaron una caracterización geoquímica de diferentes variedades químicas de rocas ígneas, de acuerdo a las correlaciones de Pearson y los diagramas de Harker. Las dos unidades han evolucionado por cristalización fraccionada de minerales ferromagnesianos y de plagioclasas cálcicas y en todas ellas el potasio (K) se enriquece con el incremento de SiO_2 . De acuerdo al diagrama TAS, el batolito Las Lomas ha sufrido una alta diferenciación magmática, abarca desde rocas básicas hasta ácidas y Noque, menos diferenciado, abarca rocas intermedias a ácidas, concordando con el diagrama Ri-R2 que confirma la misma diferenciación. De acuerdo a la saturación de alúmina, la superunidad de Las Lomas es de naturaleza metaluminosa y Noque es mayormente metaluminosa con algunas rocas peralcalinas, probablemente por la presencia de minerales ricos en Na. De acuerdo a la correlación de sílice y óxidos de Na y K y sílice-óxido de K, el batolito Noque es de naturaleza subalcalina y de la serie calcoalcalina de medio potasio y Las Lomas es subalcalina y de la serie calcoalcalina y toleítica de medio a bajo K.
4. Los procesos de cristalización magmática de acuerdo a los diagramas de tierras raras muestran que el batolito Noque está enriquecido en tierras raras ligeras y pesadas (excepción Yb), mientras que el batolito Las Lomas está enriquecido en tierras raras ligeras y empobrecidas ligeramente en tierras raras pesadas por debajo del límite 10. La superunidad Las Lomas presenta anomalía positiva de Eu, lo que indica que no ha sufrido el fraccionamiento de plagioclasas por cristalización fraccionada y el ligero empobrecimiento

to de tierras raras pesadas no indica la presencia de granate. De acuerdo al diagrama de variación de las abundancias de las tierras raras de acuerdo a las litologías, en la superunidad Noque la abundancia es mayor en rocas ácidas (granodiorita y tonalita), en la superunidad Las Lomas en rocas ácidas (granito, granodiorita, tonalita) y menor en rocas básicas (diorita, gabro). Los diagramas de proporciones y variantes de tierras raras indican que en las superunidades Las Lomas y Noque los valores del ratio La/Yb sugieren contaminación cortical durante el engrosamiento de la corteza de más de 10 km. Los valores altos de Rb y Sr indican fuerte asimilación y diferenciación en las dos unidades geológicas. Los diagramas de las variaciones litológicas de los multielementos nos muestran que en la superunidad Las Lomas y Noque están enriquecidas en LILE y todas ellas están empobrecidas con excepción en Sm.

5. La profundidad de las fuentes magmáticas se determinó mediante los diagramas SiO_2 vs. Ce/Y que arrojaron profundidades de 10 a 12 km para ambas superunidades. Mediante el diagrama Eu/Eu* vs. Ce/Y, se estima profundidad de 11 km para ambos batolitos. La antigüedad de las fuentes se determinaron según diagrama SiO_2 vs. Sm/Yb que nos arroja que ambos batolitos tienen similares proporciones de valores de Sm/Yb, por lo tanto, son contemporáneos, coincidiendo con las edades cretácicas que se les atribuye por datación relativa.
6. Desde el punto litogeoquímico, los batolitos del norte son calcoalcalinos de medio K, los del centro y sur son calcoalcalinos de alto K, el empobrecimiento de las tierras raras pesadas indican la presencia de granate en el centro y sur, todos los granitos son de naturaleza de arco volcánico. Los batolitos del norte caen en el campo de los anorogénicos y los del centro y sur en los campos de tipo I y S. La profundidad de la fuente magmática de los granitos del norte alcanza menos de 20 km. Comparando la ubicación espacial de estos batolitos Las Lomas y Noque (norte) y Cordillera Blanca (centro) se les considera como de subducción subhorizontal y Challaviento como de subducción normal.

Con relación a los resultados de la caracterización geoquímica de los intrusivos de las superunidades de Las Lomas y Noque con los batolitos de la Cordillera Blanca (Dpto. Áncash) y Challaviento (Tacna), estas unidades geológicas muestran un comportamiento geoquímico con respecto al ambiente geotectónico de subducción de placas y de granitoides de arcos volcánicos. Con respecto a los batolitos de sur y centro hay un empobrecimiento de tierras raras pesadas, lo que indica un origen mantélico rico en granates y presencia de fuerte anomalía negativa de Eu que indica un fraccionamiento de plagioclasas y las profundidades de la fuente magmática alcanza 60 y 40 km de profundidad, mientras, comparando con los batolitos de Las Lomas y Noque en el norte del Perú que caen en los campos de granito de tipo A anorogénicos, de campo de granito de arco volcánico y pertenecen a granitoides plagiogranitos oceánicos y la ausencia de anomalías de Eu, carente de grana-

te, y profundidades menores de 20 km, por lo que se confirma que el ángulo de subducción de la placa oceánica no ha alcanzado profundidades cercanas al manto como en el sur. Las edades varían desde la más antigua, Las Lomas, seguida de Noque, luego Challaviento y la más joven, la Cordillera Blanca, coincidiendo con las dataciones radiométricas.

V. 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 en esta investigación.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Acosta, H; Alván, A, Mamani, M, Oviedo, M. Rodríguez, J. (2011). Geología de los cuadrángulos de Pachia y Palca INGEMMET. Boletín N° 139 Serie A. Carta Geológica Nacional 96p.
2. Bernal, I; Tavera, H. (2002). Geodinámica, Sismicidad y Energía Sísmica en Perú. Monografía Instituto Geofísico del Perú. Centro Nacional de Datos Geofísicos.
3. Cobbing, E.J. & Pitcher, W.S. (1972). The coastal batholith of Central Peru. *Journal of the Geological Society London*, 128(5): 421-460.
4. Cobbing, J; Quispesivana, L, Paz, M. (1996). Geología de los cuadrángulos de Ambo, Cerro de Pasco y Ondores INGEMMET. Boletín No77 Serie A. Carta Geológica Nacional N° 77 238p.
5. Dalmayrac, B; Laubacher, G; Marocco, R. (1988). Caracteres generales de la evolución geológica de los Andes Peruanos. Convenio INGEMMET-ORSTOM. Boletín 12 Serie D Estudios Especiales de INGEMMET.
6. De la Roche H, Leterrier J.; Grande Claude P. ; Marchal M. (1980). A classification of volcanic and plutonic rocks using R1-R2 diagrams and mayor element analyses-its relationship and current nomenclature. *Chem. Geol.*, 29, 183-210.
7. Irvine, T.N., Baragar, W.R.A. (1971). A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks: *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8, 523-548.
8. Jaimes, F; Navarro, J; Santos, A; Bellido, F. (2012). Geología del Cuadrángulo de Las Lomas. Boletín N° 146 INGEMMET Serie A Carta Geológica Nacional.
9. Le Bas, M.J., Le Maître, R.W., Streckeisen, A., Zanettin B. (1986). A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram: *Journal of Petrology*, 27, 745-750.
10. 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° 26 Serie D Estudios Regionales INGEMMET.
11. 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.
 12. 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.
 13. Pitcher W, Atherton MP, Cobbing EJ, Beckinsale, R. (1985). Magmatism at a plate edge: The Peruvian Andes. Glasgow: Blackie, 329 p.
 14. Reyes, L; Caldas, J. (1987). Geología de los cuadrángulos de Las Playas 9-c, La Tinas 9-d, Las Lomas 10-c, Ayabaca 10-d, San Antonio 10-e, Chulucanas 11-c, Morropón 11-d, Huancabamba 11-e, Olmos 12-d, Pomahuaca 12-e. INGEMMET. Boletín N° 39 Serie A: Carta Geológica Nacional, 83 p.
 15. Ringwood A. E. (1975). Composition and petrology the Earth's Mantle. New York. MacGraw-Hill.
 16. Rivera, H; Chira, J; Chacón, N; Erick Suyo, Celis Varillas. (2014). Variación litogeoquímica de los batolitos de la Cordillera Blanca (Ancash) y Ambo-Oxapampa al sur de Huánuco. Revista IIGEO-FIGMMG-UNMSM volumen 17 N° 33, Enero-Junio 2014.
 17. Rivera, H; Chira, J; Chacón, N; Pedemonte, G; Mendoza, R. (2013). Caracterización litogeoquímica y análisis correlacional de los intrusivos de las superunidades de Yarabamba y Challaviento en el sur del Perú: Revista IIGEO-FIGMMG-UNMSM volumen 16, N° 31 Enero-Junio 2013.
 18. Shand, S.J. (1927). Eruptive Rocks: Their genesis, composition, classification and their relation to ore-deposits: Murby, London, John Wiley & Sons, New York, 370 p., Vancouver, 274 p.
 19. Wilson, J, García, W. (1962). Geología de los cuadrángulos de Pachia y Palca INGEMMET Boletín-No 4 Serie A: Carta Geológica Nacional 82 p.
 20. Winter, L.S. (2008). The genesis of 'giant' copper-zinc-gold-silver volcanogenic massive sulphide deposits at Tambogrande, Peru: age, tectonic setting, paleomorphology, lithogeochemistry and radiogenic isotopes. PhD Thesis, University of British Columbia.