

Caracterización litogeoquímica de los volcánicos de las formaciones la Bocana y San Lorenzo en departamento de Piura

Lithogeochemistry characterization of Volcanic Formations of La Bocana and San Lorenzo in department of Piura.

Hugo Rivera¹, Nestor Chacón¹, Jorge Chira¹, Jorge Espejo², Eliseo Alcalá²

RECIBIDO: 02/06/2016 - APROBADO: 30/06/2016

RESUMEN

El objetivo de la presente investigación es ampliar el conocimiento geológico y la comprensión de la composición geoquímica del magmatismo en el norte de los Andes peruanos y contribuir con el conocimiento geoquímico en los diferentes ambientes geotectónicos en los cuales se emplazan las rocas ígneas.

La Formación San Lorenzo está constituida de rocas máficas y la Bocana de rocas félsicas, ambas son de carácter subalcalinas y de la serie calcoalcalina de bajo a medio K, lo que representa una composición bimodal. Asimismo ambas son metaluminosas y tienen correlación positiva con Na₂O y K₂O y negativa con el resto de los otros óxidos. Se aprecia anomalías positivas de Ce y Th en ambas formaciones que indican una relación al marco tectónico de subducción de placas, al campo de los granitoides de Arco de Islas, a los granitoides de tipo "I" y al campo de Arco Volcánico. La profundidad de la fuente magmática se formaron dentro de una corteza no mayor de 20 km y con respecto a la antigüedad (edad relativa) ambas formaciones son coetáneas. A ambas formaciones se les considera como magmas húmedos pero con escasa fusión de agua de fuentes máficas y de carácter metaluminosas. En base a la oxidación y al contenido de agua tienen y de acuerdo a su fugacidad del oxígeno indican magmas húmedos y tienen predisponibilidad de estar asociados a elementos calcófilos y con probabilidad de presentar ocurrencias de depósitos polimetálicos.

Palabras clave: geoquímica magmática, ambiente geotectónico, elementos mayores, traza, Tierras Raras.

ABSTRACT

The aim of this research is to expand geological knowledge and understanding of the geochemical composition of magmatism in the northern Peruvian Andes and contribute to the geochemical knowledge in different geotectonic environments in which igneous rocks are locate. The San Lorenzo Formation consists of mafic rocks and La Bocana felsic rocks, both are subalkaline character and calc-alkaline series of low to medium K, which represents a bimodal composition. Are both also metaluminous and have positively correlated with Na₂O and K₂O and negative the rest of the other oxides. Positive anomalies of Ce and Th in both formations that indicate a relationship to tectonic plate subduction, the field of Island Arc Granitoids, granitoids of the type "I" and Volcanic Arc Granitoids. The depth of the magmatic source formed within no more than 20 km and with respect to age (relative age) both formations are coeval. They are considered as wet magmas but with low melting water. Based on oxidation and water content and to their oxygen fugacity indicate They have predisponibilidad to be associated with chalcophile elements and likely to present occurrences of polymetallic deposits.

Keywords: magmatic geochemistry, geotectonic environment, major elements, trace Rare Earths.

1 Docentes EAPIG Universidad Nacional Mayor de San Marcos hriveram@unmsm.edu.pe

2 Estudiantes EAPIG-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 traza de las rocas volcánicas pertenecientes a las formaciones La Bocana y San Lorenzo en el departamento de Piura.

Los objetivos generales son la evaluación de los elementos mayores, menores, traza 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 a los volcánicos y encontrar sus diferenciación química y su ambiente geotectónico de emplazamiento u origen y su relación con la mineralización de la región norte.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

En la presente investigación básica se utilizó la data proporcionada por INGEMMET cuyos geólogos recolectaron en el campo y se aplicó el método analítico inductivo y actividades correspondientes.

Partiendo de lo desconocido y mediante el análisis de los datos geoquímicos y la experimentación a través de la estadística y la graficación de los datos de abundancias de los elementos mayores, traza y tierras raras, se llega a la caracterización geoquímica y determinación de las características geológicas-geoquímicas de la fuente madre que da origen al magmatismo volcánico. Mediante este método inductivo se conceptualiza la realidad de lo que se observa y se intenta obtener conocimiento, pero además, dar explicaciones de los fenómenos geológicos implicados.

Esto también implica que el método es de investigación básica cualitativa por ser subjetiva, que genera hipótesis con la finalidad de explorar, descubrir principios o leyes sobre la caracterización geoquímica de los fenómenos del magmatismo que son causadas por interacción de factores y por la perspectiva del investigador por la proximidad de los datos.

Las muestras son de rocas volcánicas y analizadas por espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente –MS-ICP. La data geoquímica obtenida involucra sus elementos mayores (%) y los elementos traza en ppm. Se sometieron a un recálculo para eliminar a los elementos volátiles usando los programas Excel Avanzado y SPSS.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Ubicación del área de estudio

El área de estudio se encuentra entre los paralelos 80° a 80° 30' longitud Este y 4° 30' - 5° latitud sur, comprendiendo al departamento de Piura (Figura 1), localizado en el noroeste del Perú entre la cordillera Occidental y los cerros Amotape. En esta área, INGEMMET colectó la data geoquímica de los trabajos de Winter, 2008; Ríos, 2004; Jaimes, 2012 en total 128 muestras de rocas volcánicas perteneciente a las formaciones San Lorenzo (86 muestras) y La Bocana (42 muestras), analizando a todas ellas por análisis de rocas total incluyendo los óxidos ma-

yores (8), menores (3), trazas (20) y tierras raras (15) con el fin de analizar geoquímicamente.

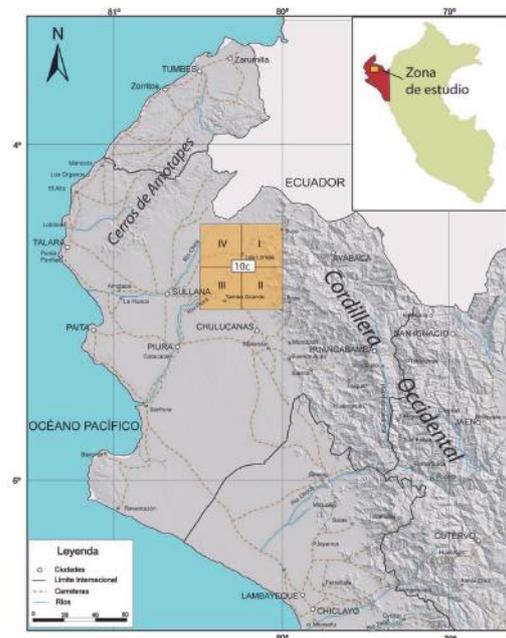


Figura N.º 1: Mapa de ubicación del área de estudio (cuadrángulo de Las Lomas 10-c) donde afloran las formaciones La Bocana y San Lorenzo (tomado de Jaimes, Freddy, 2012)

3.2. Descripción de las formaciones

3.2.1 Formación La Bocana: (Albiano superior-Turoniano inferior)

Reyes y Caldas (1987) la definen en la localidad tipo del caserío de La Bocana. Winter 2008 menciona que la Formación La Bocana marca el retorno del volcanismo bimodal de rocas andesíticas basálticas y riolíticas, con gran abundancia de rocas volcanoclásticas. La presencia de depósitos piroclásticos incluyendo tufos ricos en cristales y secuencias de calizas interestratificadas, pueden indicar un cambio de ambiente deposicional a un medio de aguas someras. Los principales afloramientos.

Suprayace directamente, a la Formación El Ereo e infrayace en aparente discordancia a la Formación Lancones. Presenta numerosos diques andesíticos y

Litología y ambiente volcano sedimentario. Litológicamente, la Formación La Bocana se ha dividido en tres miembros: Miembro inferior: constituido por basaltos, andesitas basálticas, andesitas y riolitas con algunos niveles volcanoclásticos. Miembro medio: conformado por calizas lodolíticas y margas grises oscuras laminadas, cortadas por diques y sills andesíticos, que se intercalan con arenas calcáreas grises verdosas, tobas y coladas de andesitas basálticas con disyunción columnar.

Miembro superior: está formado por aglomerados volcánicos masivos andesíticos y andesita basáltica con grandes litoclastos angulosos a subredondeados y con algunas intercalaciones de sedimentos calcáreos impuros (Valdivia y Torres, 1995).

3.2.2 Formación San Lorenzo: (Albiano medio a superior)

Las dificultades en el cartografiado llevaron a serias contradicciones para definir esta unidad. En principio era definida como Formación Lancones y Formación La Bocana (Reyes y Caldas, 1987), quienes basaron sus apreciaciones de acuerdo a sus características petrológicas.

Posteriormente, Ríos (2004), define a esta unidad como la base de los volcánicos mesozoicos, renombrándola como la Formación El Ereó. Finalmente, Winter (2008), en base a dataciones radiométricas, la introduce bajo el nombre de Formación Cerro San Lorenzo, con su localidad tipo ubicada al sur del reservorio de San Lorenzo, nombre que será usado por Jaimes 2012.

Estratigráficamente, la Formación San Lorenzo constituye la parte inferior de la secuencia volcánica del sector occidental de la cuenca Lancones que descansa directamente sobre la Formación San Pedro (Reyes y Caldas, 1987) y sobre el basamento Paleozoico del Complejo de Olmos. La parte superior infrayace bajo la secuencia volcánica de la Formación El Ereó.

Esta formación está caracterizada por un vulcanismo bimodal, con una litología conformada por lavas masivas andesíticas a andesítico-basálticas y lavas basálticas con estructura almohadillada. Este vulcanismo submarino es relativamente profundo, lo que es evidenciado por la ausencia de rocas piroclásticas y la presencia de niveles delgados de lutitas negras laminadas.

3.3 Dominio geotectónico Modelos para el proceso de subducción según Bernal y Tavera (2002)

La interacción de la placa de Nazca y la Sudamericana es el principal proceso tectónico que define la geodinámica de Perú.

Asimismo, 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 2. La subducción "subhorizontal" está presente en las regiones Norte-Centro y se caracteriza porque 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 hasta una distancia de 450 km desde la línea de fosa. Entre ambos modos de subducción, se produciría la contorsión de la placa.

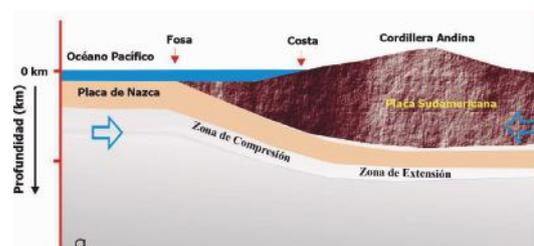


Figura N.º 2: Subducción de placas subhorizontal en el norte del Perú (Bernal y Tavera, 2002)

3.4 Caracterización geoquímica de las rocas volcánicas

Para este estudio se analizaron la data del análisis de roca total de muestras representativas de rocas ígneas volcánicas de las Formaciones La Bocana y San Lorenzo en el norte del Perú.

Obteniendo una tabla recalculada sobre la base anhidra de los datos y para graficar todos los resultados geoquímicos se utilizaron el programa computacional de Excel avanzado siguiendo los diagramas creados para los diferentes fines de la geoquímica magmática por diversos autores.

3.4.1 Diagrama sílice vs álcalis total -TAS-

La Formación San Lorenzo según el diagrama TAS (Figura 3) muestra una alta diferenciación que abarca traquibasalto, basalto, traquiandesita basáltica/andesita basáltica, andesita/traquiandesita, mayormente rocas básicas (60.46%) y desde la dacita/traquidacita (18,60%) y riolitas (20.94%) (> 66% de SiO₂) (Tabla 4.1); en líneas generales está constituida mayormente de rocas básicas.

La Formación La Bocana según el diagrama TAS (Figura 4) muestra una menor diferenciación que la Formación San Lorenzo que abarca mayormente el campo de las basaltos, traquiandesita basáltica, andesita basáltica, andesita (38.09%) con sílice (51 a 63% de SiO₂) seguido de una serie de rocas mayormente de naturaleza dacítica/traquidacita y de riolitas (61.91%) (>66% de sílice) (Tabla 4.1), en líneas generales está constituida de rocas félsicas o ácidas.

Según los óxidos mayores, el comportamiento químico de las muestras varía de una composición básica a ácida siguiendo una tendencia positiva del aumento de álcalis con el aumento de sílice.

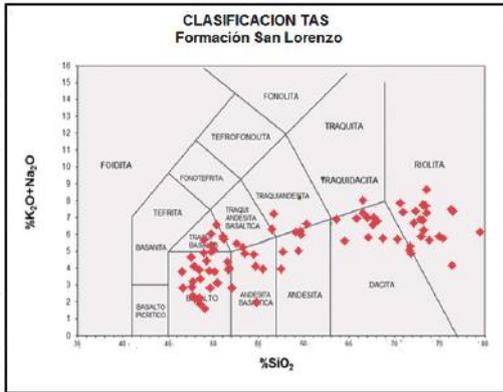


Figura N.º 3: Formación San Lorenzo, mostrando una diferenciación magmática de una fuente magmática básica.

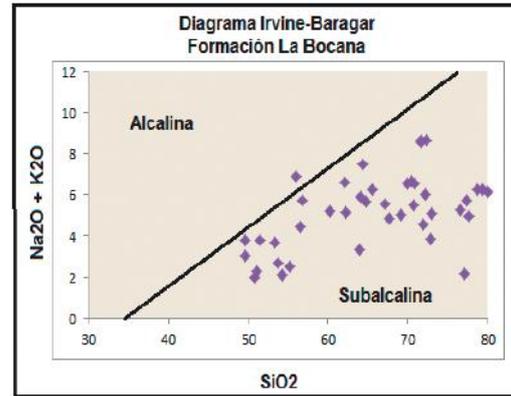


Figura N.º 6: La Formación La Bocana muestra su tendencia subalcalina

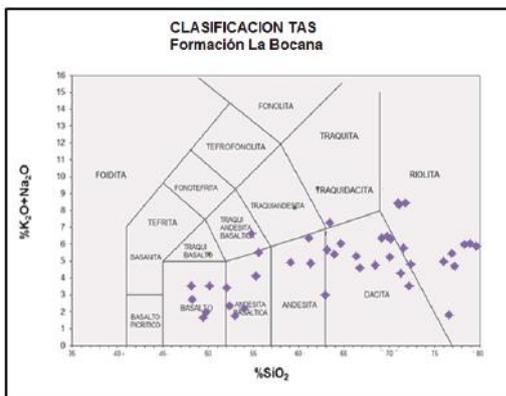


Figura N.º 4: Formación La Bocana, mostrando una diferenciación proveniente de una fuente magmática de naturaleza básica a intermedia.

3.4.2 Diagrama TAS para rocas volcánicas

El diagrama TAS de Irvine y Baragar (1971) y Miyashiro (1978) es utilizada para clasificar las rocas volcánicas en alcalinas y subalcalinas.

En ambas formaciones volcánicas, San Lorenzo (Figura 5) y la Bocana (Figura 6) la mayoría de las muestras caen en el campo de la subalcalinas y algunas caen en el campo de las alcalinas probablemente estén ligeramente contaminadas por procesos hidrotermales.

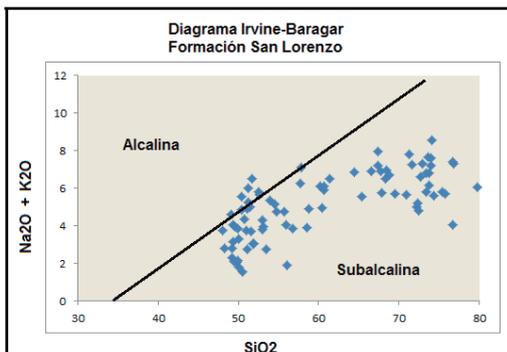


Figura N.º 5: La Formación San Lorenzo muestra su tendencia subalcalina.

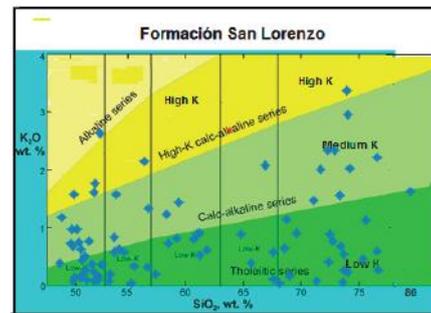


Figura N.º 7: La Formación San Lorenzo muestra una composición principalmente bimodal entre la naturaleza toleítica y calcoalcalina.

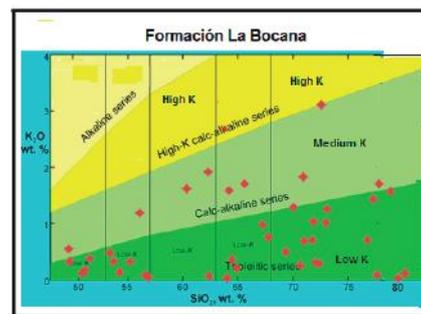


Figura N.º 8: La Formación La Bocana es mayormente toleítica a calcoalcalina de medio K.

3.4.4 Saturación de Alúmina

De acuerdo al Índice de Shand (1927) (relación molar de $Al/Ca+Na+K$ vs $Al/Na+K$ o A/CNK vs A/NK en el diagrama de Maniar y Piccolli (1989) se establece el carácter metaluminoso o peraluminoso de las rocas.

Se tiene que en el caso de la Formación San Lorenzo 70.93% del total de muestras son de saturación metaluminosa y el 29.07% son peraluminosa (Figura 9), mientras que la Formación La Bocana el 76.19% del total de las muestras tienen una tendencia metaluminosa y 23.81% peraluminosa (Figura 10).

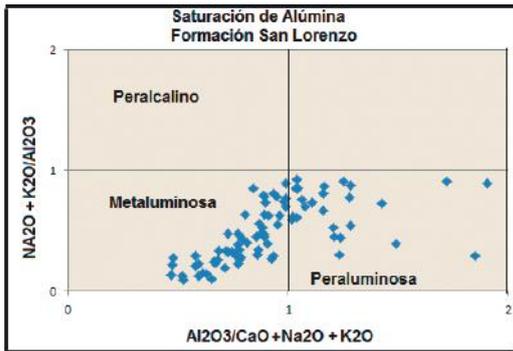


Figura N.º 9: Saturación de Alúmina de la Formación San Lorenzo mostrando su característica mayoritariamente metaluminosa.

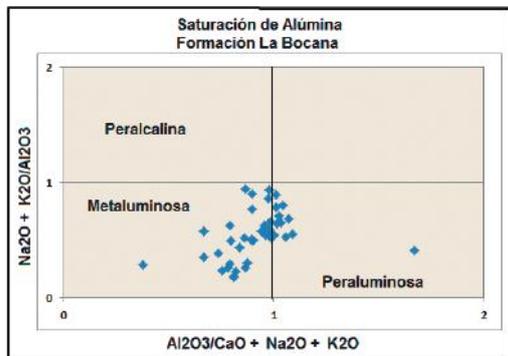


Figura N.º 10: Saturación de la Formación La Bocana mostrando su característica metaluminosa.

Que las dos formaciones son mayormente de saturación metaluminosa, se supone que están subsaturada en alúmina al contener piroxenos, biotita y hornblenda, lo que se confirma gráficamente. El carácter peraluminoso de algunas de las rocas tanto en los volcánicos de San Lorenzo y La Bocana, se deba a que estas rocas han sufrido alteración hidrotermal del tipo sericítico como también por la inclusión de fragmentos líticos de estas rocas.

3.4.5 Diagramas de Harker

El contenido de SiO_2 en la Formación San Lorenzo varía entre 48.09 y 84.80% en peso, valores ligeramente más altos respecto a la Formación La Bocana, cuyo contenido varía de 49.55 a 80.67% en peso, comparando la media de este óxido es mayor en la Formación La Bocana con 65.83% con respecto a la de San Lorenzo de 61.14%.

Las concentraciones de elementos mayores entre estos dos grupos de rocas volcánicas hay un predominio en abundancia promedio en la Formación San Lorenzo en TiO_2 , MnO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , K_2O , P_2O_5 y en la Formación La Bocana solo en SiO_2 y Na_2O .

En los diagramas de variación de elementos mayores se puede observar que las rocas analizadas presentan tendencias de altas correlaciones negativas para el TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO y P_2O_5 con respecto al SiO_2 , en los dos grupos de volcánicos mientras que el K_2O y Na_2O tienen baja correlación positiva (Figuras 11 y 12).

Estos rangos de variación sugieren un grado de evolución por cristalización fraccionada de minerales ferromagnesianos y plagioclasas cálcicas. 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 volcánicos.

Ambas formaciones presentan una correlación positiva con respecto a los álcalis y correlación negativa con los alcalinotérreos y hierro ferroso-férrico (Figura 13).

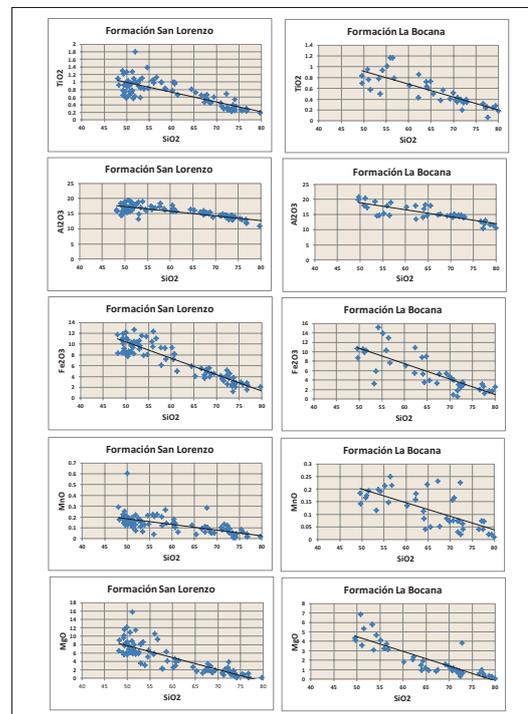


Figura N.º 11: Diagramas Harker de TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO .

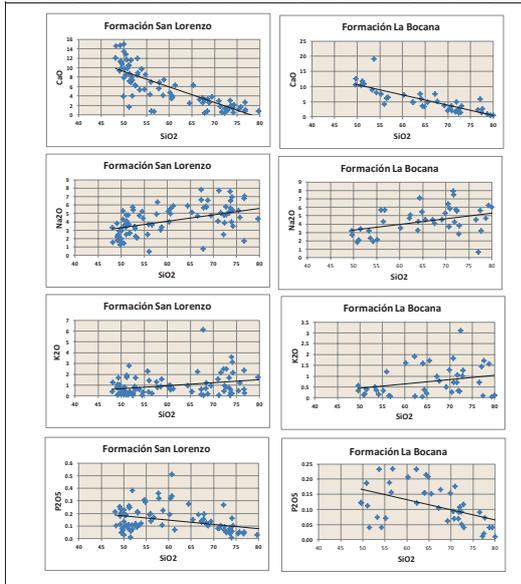


Figura N.º 12: Diagramas Harker de CaO, Na₂O, K₂O, P₂O₅

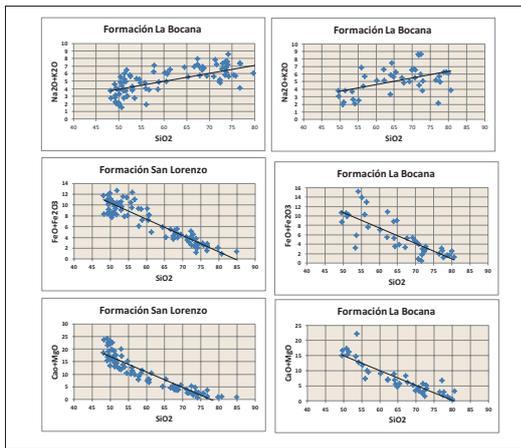


Figura N.º 13: Diagramas Harker de Na₂O+K₂O, FeO+Fe₂O₃, CaO+MgO

3.4.6: Diagrama de tierras raras normalizadas

Los promedios de abundancia de tierras raras tanto en las formaciones San Lorenzo y La Bocana fueron normalizados de acuerdo al “Índice de los condritos de Wakita”.

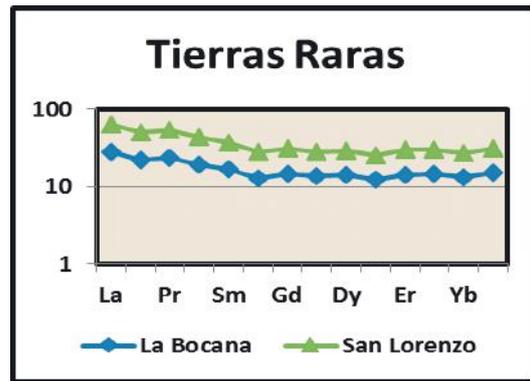


Figura N.º 14: Diagrama de Tierras Raras normalizadas de las Formaciones San Lorenzo y La Bocana

Los diagramas spider nos demuestran una cristalización fraccionada.

Hay un enriquecimiento en ambas grupos de volcánicos (Figura 14) en las Tierras Raras Ligera-LREE- hasta el Eu por encima del intervalo 10, y un enriquecimiento en Tierras Raras Pesadas-HREE a partir del Gd hasta el Lu ligeramente por encima del intervalo 10 en ambos grupos de volcánicos. La Formación San Lorenzo es ligeramente más rica en LREE y en HREE que la Formación La Bocana.

Este enriquecimiento de Tierras Raras pesadas por encima del intervalo 10 podría indicar la ausencia de granate en ambos volcánicos, aunque no es muy clara.

La anomalía negativa del Eu con respecto al Sm y al Gd en el espectro normalizado de REE de la Formación La Bocana se estima como indicadora de separación de las plagioclasas por cristalización fraccionada de la roca fuente, mientras que en la Formación San Lorenzo no es tan evidente esta anomalía por lo que se estima que hubo un ligero fraccionamiento.

Las Formaciones San Lorenzo y La Bocana presentan un claro paralelismo y poca pendiente > 10 con respecto a HREE.

3.4.7 Abundancia Multielemental de las formaciones

Los valores de normalización utilizado por Pearce (1983) se toman del promedio MORB de Pearce *et al.* (1981). Una lista más larga de elementos dispuestos en un orden ligeramente diferente es utilizado por Bevins *et al.* (1984).

El diagrama spider multielemental de las dos formaciones San Lorenzo y La Bocana, (Figura 15) nos muestra un ligero enriquecimiento de los elementos LILE (>10) de Ba, Th, Ta y un empobrecimiento de elementos LILE y HFSE menor del intervalo 10, desde el Sr a Rb y del Ta hasta el Yb. Se aprecian anomalías negativas de Nb y Ti en la Formación San Lorenzo y en La Bocana en Ti, anomalías positivas de Ce y Th, que nos indica que ambos grupos de volcánicos están relacionados a un marco tectónico de subducción de placas. El empobrecimiento de las tierras raras pesadas debajo del intervalo 10 nos indica la presencia de granate.

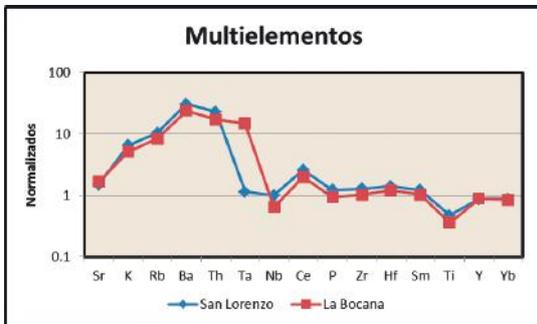


Figura N.º 15: Diagrama Spider de multielementos de las formaciones San Lorenzo y La Bocana.

3.5 Diagramas discriminantes de ambientes tectónicos

La idea de diferenciar químicamente los magmas provenientes de los diferentes ambientes geotectónicos se deba probablemente a Pearce y Cann (1971 y 1973), quienes en sus dos trabajos, mostraron que era posible usar la geoquímica para distinguir los basaltos producidos en diferentes ambientes tectónicos conocidos.

3.5.1 Diagrama de Shand

Los volcánicos de ambas formaciones caen en el campo de los Granitoides de Arco de Islas, (Figura 16) lo que indica que el magmatismo al norte del Perú está influenciado por la tectónica de subducción de placas.

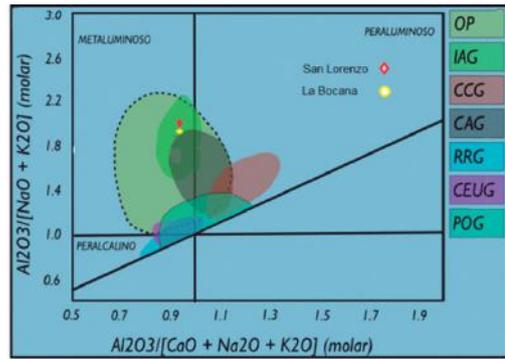


Figura N.º 16: Diagrama de discriminación tectónico de Shand

3.5.2 Diagrama de Chappell y White: SiO_2 vs $Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$

Este diagrama está conformado de dos campos separados, uno correspondiente a los granitos del Tipo I y S. La Figura 17 nos muestra que ambas formaciones volcánicas son de carácter metaluminoso y caen en el campo del Granitoides Tipo "I"

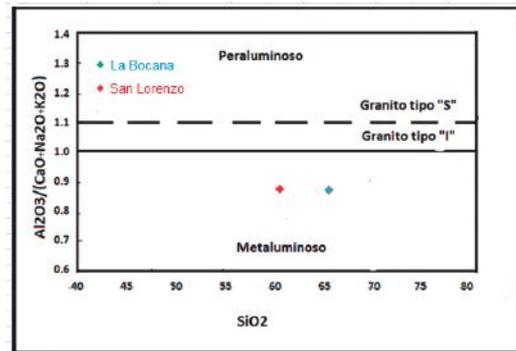


Figura N.º 17: Diagrama Chappell y White.

3.5.3 Diagrama de Pearce: $(Y+Nb)$ vs Rb

Pearce *et al.* (1984) determinaron el diagrama de discriminación de ambiente tectónico para granitoides basados en las relaciones logarítmicas de los valores de $Y+Nb$ (log) versus Rb (log).

Los volcánicos de San Lorenzo y La Bocana (Figura 18) caen en el campo de granitos de arco volcánico.

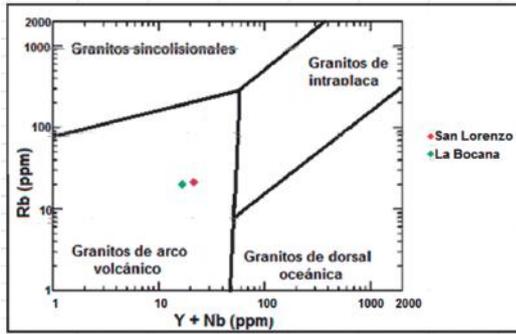


Figura N.º 18: Diagrama de Pearce: (Y+Nb) vs Rb de las dos unidades geológicas.

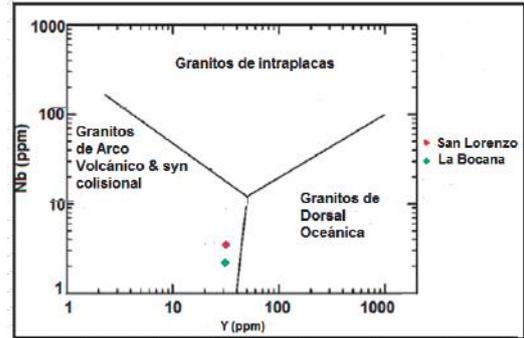


Figura N.º 20: Diagrama de Pearce: Y vs Nb

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

Según Pearce, el diagrama de las relaciones logarítmicas (Y+Nb) versus Nb nos muestran los diferentes ambientes tectónicos. Los volcánicos de las formaciones San Lorenzo y La Bocana caen en el campo de los granitos de arco volcánico (Figura 19), lo mismo que resulta de aplicar el Diagrama de Pearce (Y+Nb) vs Rb.

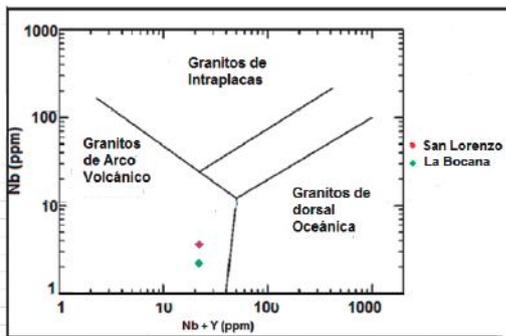


Figura N.º 19: Diagrama de Pearce: (Nb+Y) vs Nb.

3.5.5 Diagrama de Pearce: Y vs Nb

Según Pearce el diagrama de las relaciones logarítmicas de Y versus Nb nos muestran cuatro diferentes ambientes tectónicos.

Las rocas granitoides de las formaciones San Lorenzo y La Bocana caen mayormente en el campo de los Granitos de Arco Volcánico y Granitos de Colisión simultánea (Figura 20), similares ambientes tectónicos encontrados en los diagramas (Y+Nb) vs Rb (Figura 18) y (Nb+Y) vs Nb (Figura 19).

3.5.6 Diagrama (Yb+Ta) vs Rb

Este diagrama (Figura 21) basado en las relaciones logarítmicas de los valores Yb+Ta vs Rb nos muestra que las dos unidades geológicas estudiadas se encuentran en el campo de los granitos de arco volcánico (VAG).

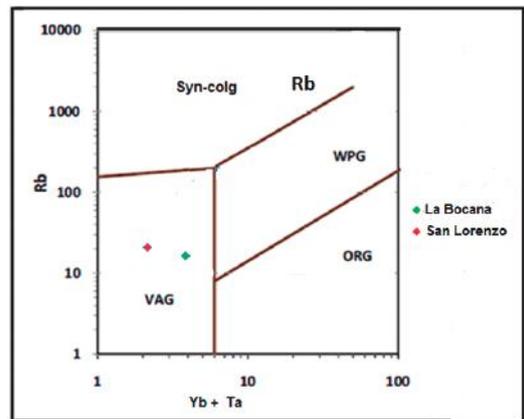


Figura N.º 21: Diagrama de (Yb+Ta) vs Rb.

3.5.7 Profundidad de la fuente magmática SiO₂ vs Ce/Y

Para estimar la profundidad de las cámaras magmáticas donde se generan los magmas, se plotó los promedios de los valores en ppm del Ce/Y vs SiO₂ en %, de las dos formaciones en el diagrama Ce/Y vs SiO₂ propuesto por Mantle y Collins (2008), en donde se observa que los volcánicos estudiados (Figura 22) se formaron dentro de una corteza con espesor no mayor de 20 Km.

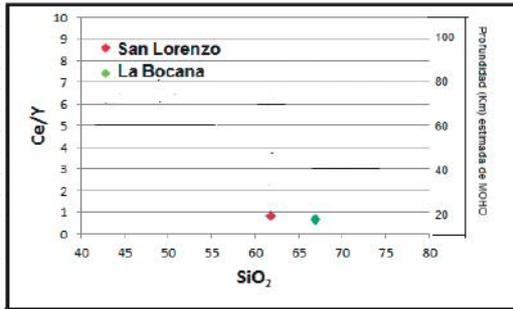


Figura N.º 22: Diagrama de profundidad estimada para las dos Formaciones.

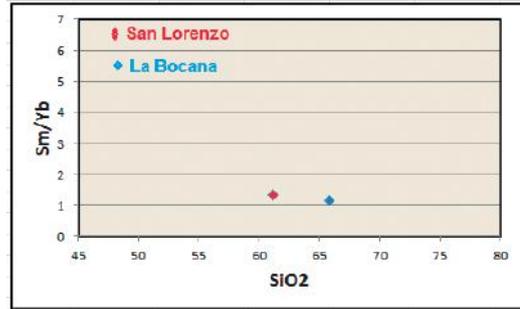


Figura N.º 24: Diagrama para determinar la antigüedad de las rocas: SiO₂ vs Sm/Yb

3.5.8 Profundidad estimada: Eu/Eu* vs Ce/Y

El diagrama Eu/Eu* vs Ce/Y (Figura 22) determina la profundidad estimada de asimilación del magma. Se usan estos elementos Tierras Raras dado que el resto de las tierras raras son trivalentes, el Eu bivalente presenta un comportamiento diferencial produciendo anomalías que se mide por la razón Eu/Eu* definida como:

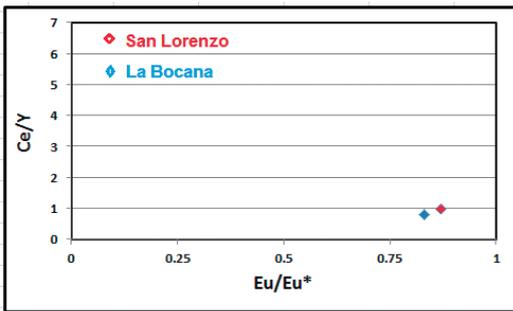


Figura N.º 23: Diagrama de profundidad de las fuentes de los volcánicos de las formaciones San Lorenzo y La Bocana.

Las rocas volcánicas de las Formaciones San Lorenzo y La Bocana tienen valores bajos de Ce/Y menor de 1 por lo tanto estas rocas se formaron dentro de una corteza no mayor de 20 Km es decir tienen una profundidad de asimilación del magma menor a 20 km aproximadamente (Figura 23).

3.5.9 Antigüedad de los magmas: SiO₂ vs Sm/Yb

Este diagrama (Figura 24) contrasta la abundancia del SiO₂ vs el ratio o proporción de Sm/Yb, este ratio va a determinar la antigüedad de la roca a nivel de los Andes sudamericanos, es un estándar proporcional. 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.

Las rocas volcánicas de la Formación San Lorenzo tiene ligera abundancia de Sm/Yb con respecto a la Formación La Bocana, por lo tanto se asumiría que es la más reciente, debido a su similares abundancias se asume que tengan la misma edad, confirmando las edades establecidas para cada una de las unidades investigadas.

3.6 Fluidos hidrotermales y mineralización

En esta investigación usando diagramas geoquímicos se ha estimado las características de los magmas, la diferenciación de los magmas, el grado de oxidación, su contenido de agua y su relación con los fluidos hidrotermales, y su asociación a la mineralización. Además, con los estudios de las últimas décadas se sabe que las anomalías de Eu/Eu* es un factor importante en la determinación de los fluidos que están asociados a los magmas fértiles.

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

Conociendo que los elementos radiactivos U y Th incrementan sus concentraciones en la corteza superior, hecho que implica que ha habido una mayor contaminación cortical y mayor circulación de fluidos hidrotermales. Por lo tanto, en este diagrama se determina que los valores promedios de U y Th de las rocas volcánicas de las Formaciones San Lorenzo y La Bocana tienen menor contaminación cortical superior (Figura 25) como lo determina la abundancia del U que es muy baja y por dicho motivo tiene menor circulación de fluidos y sus posibilidades de transportar iones metálicos es baja y pueda que no tengan relación a depósitos minerales.

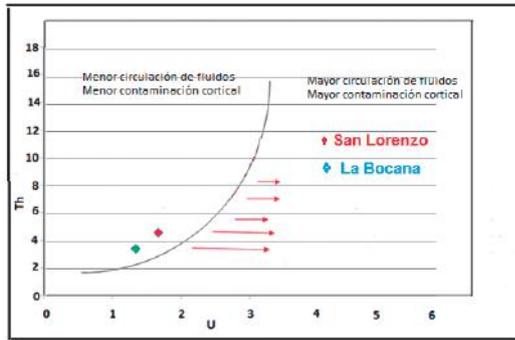


Figura N.º 25: Diagrama de circulación de fluidos hidrotermales

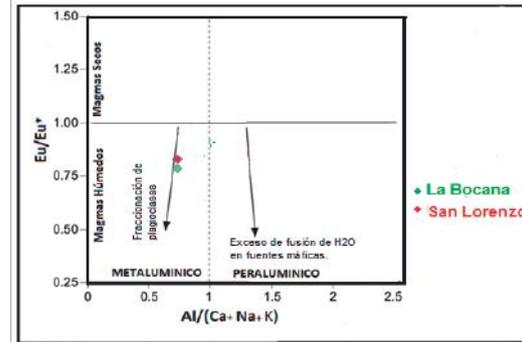


Figura N.º 27: Diagrama de magmas húmedos y secos entre álcalis y Eu/Eu*.

3.6.2 Diagrama de diferenciación de los eventos magmáticos: SiO₂ vs FeO

El primero se trata de rocas básicas a intermedias que comprenden a las rocas volcánicas de la Formación San Lorenzo por ser más ricos en FeO total y que disminuye con el aumento de la sílice, que presenta una fuerte oxidación probablemente por acción de flujos hidrotermales o alteración intempérica. (Figura 26).

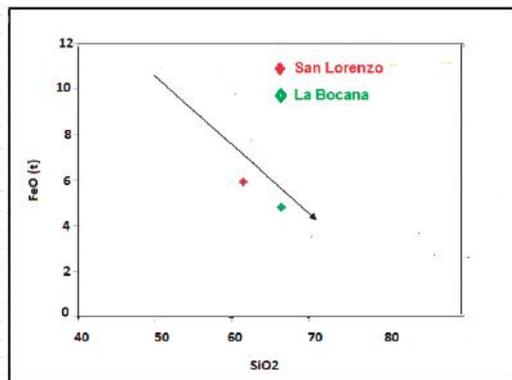


Figura N.º 26: Diagrama de diferenciación de eventos magmáticos

El segundo evento son las rocas volcánicas de la Formación La Bocana bien diferenciadas de bajo contenido de hierro y alto contenido de sílice, en promedio de composición ácida.

3.6.3 Diagrama Tipos de Magmas secos o hidratados: Al/(Ca+Na+K) vs Eu/Eu*.

Según el diagrama de Alúmina/álcalis vs Eu/Eu*, calculado los valores de alúmina /álcalis en proporciones molares y el ratio Eu/Eu* los valores se han normalizado de acuerdo a los valores de Wakita (Figura 27).

Los promedios de los valores de alúmina/álcalis vs Eu/Eu* los magmas que dan origen a las Formaciones San Lorenzo y La Bocana son de carácter metaluminosa y se observa un fraccionamiento de plagioclasas y ambas se les considera dentro de los magmas húmedos debido a la escasa fusión de agua de fuentes máficas.

3.6.4 Diagrama Estado de Oxidación vs. Contenido de Agua: Eu/Eu* vs Fe total.

En base al estado de oxidación vs el contenido agua (Figura 28) ambas formaciones están relacionadas a la mineralización polimetálica representado por Zn-Pb-Ag.

Las rocas de las dos unidades caen en el campo de la corteza continental o primitiva y dentro de los granitos "tipo I" o de la "serie de la magnetita", también están reducidos relativamente al incremento de la fugacidad de oxígeno, es decir, indican que son magmas húmedos.

Además ambas tienen predisponibilidad de estar asociadas a elementos calcófilos, es decir, a elementos de transición que tienen afinidad al azufre, por lo tanto, las rocas de las formaciones San Lorenzo y La Bocana están asociados a magmas de la serie de la magnetita y con probabilidad de ocurrencias de depósitos polimetálicos.

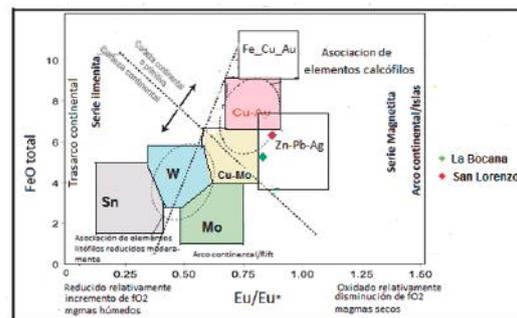


Figura N.º 28: Diagrama de contenido de agua vs oxidación y mineralización.

IV. CONCLUSIONES

- De acuerdo al diagrama TAS, la Formación San Lorenzo está constituida de rocas máficas y La Bocana de rocas félsicas, ambas son de carácter subalcalinas y de la serie calcoalcalina de bajo a medio K, lo que representa una composición bimodal. De acuerdo a la saturación de alúmina ambas son metaluminosas. Los diagramas de Harker nos muestran que ambas tienen correlación positiva con Na_2O y K_2O y negativa con el resto de los otros óxidos, que sugieren un grado de evolución por cristalización fraccionada de minerales ferromagnesianos y plagioclasas cálcicas.
- Hay un enriquecimiento en ambos volcánicos de tierras raras ligeras, hasta el Eu y desde el Gd hasta el Lu un ligero enriquecimiento notándose una mayor proporción en tierras raras en Formación San Lorenzo. El enriquecimiento de tierras raras pesadas podría indicar la ausencia de granate en ambas formaciones. La anomalía negativa de Eu con respecto al Sm y Gd en la Formación La Bocana se estima como indicadora de separación de plagioclasas por cristalización fraccionada mientras que en la Formación San Lorenzo no es tan evidente por lo que se estima que hubo un ligero fraccionamiento. Con respecto a los diagramas multielementales nos muestran un ligero enriquecimientos de los elementos LILE de Ba, Th, Ta y un empobrecimientos de los otros elementos LILE y HFSE. Se aprecian anomalías negativas de Nb y Ti en San Lorenzo y de Ti en La Bocana y anomalías positivas de Ce y Th en ambas formaciones que indican una relación al marco tectónico de subducción de placas.
- Las rocas volcánicas de ambas formaciones pertenecen al campo de los granitoides de Arco de Islas, a los granitoides de tipo "I" y al campo de Arco Volcánico. La profundidad de la fuente magmática que dio origen a estos volcánicos se formaron dentro de una corteza no mayor de 20 km y también a una profundidad de asimilación menor de 20 km y con respecto a la antigüedad (edad relativa) ambas formaciones son coetáneas.
- Por los valores de U y Th ambas formaciones tienen poca contaminación cortical superior, por ello tienen menor circulación de fluidos y sus posibilidades de transportar iones metálicos es baja y pueden que no tengan relación con depósitos minerales. A ambas formaciones se les considera como magmas húmedos pero con escasa fusión de agua de fuentes máficas y de carácter metaluminosas. En base a la oxidación y al contenido de agua tienen tendencia a los granitoides de tipo "I" o de la serie de la magnetita y de acuerdo a su fugacidad del oxígeno indican magmas húmedos y tienen predisponibilidad de estar asociados a elementos calcófilos y con probabilidad de presentar ocurrencias de depósitos polimetálicos.

V. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a las autoridades de INGEMMET por el uso de la data geoquímica y a las autoridades de la Facultad por la publicación de esta investigación.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bernal, I., Tavera, H. (2002). *Geodinámica, Sismicidad y Energía Sísmica en Perú*. Monografía. Instituto Geofísico del Perú.
- Bevins, R.E., Kokelaar, B.P. and Dunkley. (1984). Petrology and geochemistry of lower to middle Ordovician igneous rocks in Wales: a volcanic arc to marginal basin transition. *Proc. Geol. Ass.*, 95, pp: 337-347
- De la Roche, H.; Leterrier, J.; Grande Claude, P.; Marchal, M. (1980). *A classification of volcanic and plutonic rocks using R1-R2 diagrams and major element*.
- Harker, A., (1909). The natural history of igneous rocks. Methuen, London.
- 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, pp: 523-548.
- Jaimes, F., Santos, A., Navarro, J. & Bellido, F. (2012). Geología del cuadrángulo de Las Lomas. INGEMMET, *Boletín*, Serie A: Carta Geológica Nacional, 146, 128 p., 4 mapas.
- 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, pp: 745-750.
- Pearce, J., Alabaster, T., Shelton, A.W.; and Searle M.P. (1981). The Oman ophiolite as a Cretaceous arc-basin complex: evidence and implications. *Phil. Trans. R Soc.* A300, pp : 299-300.
- Pearce, J. y Cann, J.R. (1971). Ophiolite origen investigated by discriminant analysis using Ti, Zr, and Y. *Earth and Planetary Science Letters*, 19, pp: 339-349.
- Pearce, J. y Cann, J. (1973). Tectonic setting of basis volcanic rocks determined using trace element analysis. *Earth and Planetary Science Letters*, 19, pp:290-230.
- Reyes, L. & Caldas, J. (1987). Geología de los cuadrángulos de Las Playas, La Tina, Las Lomas, Ayabaca, San Antonio, Chulucanas, Morropón, Huancabamba, Olmos y Pomahuaca. INGEMMET, *Boletín*, Serie A: Carta Geológica Nacional, 39, 83 p.

12. Ringwood, A.E. (1975). *Composition and petrology the Earth's Mantle*. New York. MacGraw-Hill.
13. Ríos, A. (2004) . Estudios del metalotecto Lancones y su potencial por yacimientos de sulfuros masivos volcanogénicos (VMS) - (Piura – Perú). Descripción, interpretación y potencial. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, pp :364.
14. Shand, S.J. (1927). *Eruptive Rocks: Their genesis, composition, classification and their relation to ore-deposits*: Murby, London, John Wiley & Sons, New York, pp: 370.
15. Valdivia, J. & Torres, A. (1995). Evolución estratigráfico-estructural en relación con la ocurrencia de mineralización volcanogénica en la cuenca de Lancones- Piura. En: *Sociedad Geológica del Perú*, Volumen Jubilar Alberto Benavides. Lima: Sociedad Geológica del Perú, pp: 327- 335.
16. Winter, L.S. (2008) . The genesis of 'giant' copper-zinc –gold -silver volcanogenic massive sulphide deposits at Tambogrande, Perú: age, tectonic setting, paleomorphology, lithogeochemistry and radiogenic isotopes. PhD Thesis, University of British Columbia, Vancouver, 274 p.