

Las fosforitas del Mioceno y su relación con el contenido económico de los fosfatos de Pisco y Sechura (Perú)

Miocene phosphorites and its relationship with economic content of the Pisco and Sechura phosphates (Peru)

Franklin Abarca Castañeda¹, Luis Reyes Rivera²

RECIBIDO: 06/11/2015 - APROBADO: 30/06/2016

RESUMEN

Nuevos datos geoquímicos, petrográficos, DRX, y MEB, de las rocas fosfáticas miocénicas peruanas son presentados para determinar su relación genética con el contenido económico de los fosfatos de Pisco y Sechura. Los principales elementos mayores en orden decreciente de abundancia incluye Si, Ca, P, Al, Mg, K, Na y Fe. Altos contenidos de P y Ca, reflejan alta concentración de apatito (>16.5%) en las rocas fosfáticas económicas de Pisco y Sechura. Alto contenido de Si refleja principalmente alta concentración de restos biogénicos y granos detríticos de cuarzo. Algunas rocas fosfáticas de Pisco contienen mayores concentraciones de elementos traza en orden decreciente de abundancia Cd, As, U, Se, Th. En Sechura las mayores concentraciones incluye U, As, Cd, Se. En orden de magnitud se presentan empobrecidas en tierras raras Ce, La, Y, Yb. La mineralogía fue determinada mediante estudios petrográficos en secciones delgadas y verificadas por DRX, incluyen fluorapatito, cuarzo, feldespato, sílice opalina, calcita, ankerita y dolomita. Hidroxiapatito ocurre como mineral de apatito subordinado en Sechura. Muscovita con o sin esmectita ocurren en la mayoría de rocas fosfáticas de Pisco y Sechura, su presencia sugiere un origen detrítico. Heulandita y sepiolita, se presentan restringidamente en algunos sedimentos fosfáticos de Pisco, tienen un origen autigénico y son indicadores de un ambiente deposicional de paleoclimas cálidos. Petrográficamente las rocas fosfáticas económicas fueron clasificados en tres facies principales a) fosforitas oolíticas (Pisco y Sechura), depositadas en ambientes de plataforma de alta energía dominado por oolitos fosfáticos que sugieren retrabajo después de su deposición, b) fosforitas intraclásticas (Sechura), dominado por intraclastos fosfáticos depositados en ambiente de plataforma carbonatada somera, y c) nódulos y conglomerados fosfáticos (Pisco), que suelen ocurrir durante los hiatos en la sedimentación controlados por movimientos tectónicos. Análisis con MEB en superficies de pequeños oolitos, intraclastos, y cemento de nódulos, sugieren que el apatito se formó autigénicamente como una precipitación química directa y en forma más rara por reemplazamiento. Químicamente los apatitos de Pisco y Sechura son similares, y denotan deficiencia en cloro. La combinación de los datos obtenidos puede servir como modelo de exploración de los fosfatos económicos en Pisco y Sechura.

Palabras clave: Roca fosfática, oolito, autigénico, apatito, nódulo, biogénico.

ABSTRACT

New geochemical, petrographic, XRD and SEM data of Miocene Peruvian phosphate rocks are presented to determine the genesis, and its relationship with the economic content of Pisco and Sechura phosphates. The main major elements in decreasing order of abundance include Si, Ca, P, Al, Mg, K, Na and Fe. High contents of P and Ca, reflect high concentration of apatite (> 16.5%) in economic phosphate rocks of Pisco and Sechura. High Si content mainly reflects high concentration of biogenic debris and detrital quartz grains. Some phosphate rocks of Pisco contain higher concentrations of trace elements in order of decreasing abundance Cd, As, U, Se, Th. Higher concentrations from Sechura includes U, As, Cd, Se. In order of magnitude occur depleted in rare earth Ce, La, Y, Yb. Mineralogy was determined by petrographic thin sections studies and verified by XRD, include fluorapatite, quartz, feldspar, opaline silica, calcite, ankerite and dolomite. Hydroxyapatite occurs as subordinate apatite mineral in Sechura. Muscovite with or without smectite occur in most phosphate rocks of Pisco and Sechura, their presence suggests a detrital origin. Heulandite and sepiolite, are presented narrowly in some phosphatic sediments of Pisco, have an authigenic

1 Egresado de Posgrado en Geología con mención en Recursos Mineros, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú. E-mail: abarca_f@yahoo.com

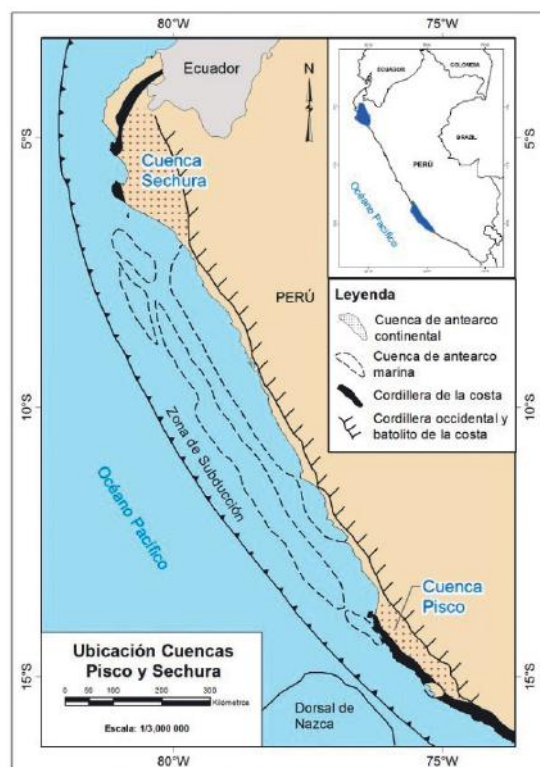
2 Docente asesor de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú. E-mail: lureri@yahoo.com

origin and are indicators of depositional environment of warm paleoclimates. Petrographically the economic phosphate rocks it were classified into three main phosphaticfacies a) Ooliticphosphorite (Pisco and Sechura), deposited in platform high-energy environment dominated by phosphaticoolites suggesting rework after deposition, b) intraclasticphosphorite (Sechura) dominated by phosphaticintraclasts deposited in shallow carbonate platform environment, and c) phosphatic nodules and conglomerates (Pisco), which usually occur during hiatus in sedimentation controlled by tectonic movements. SEM analysis on small surfaces oolites, intraclasts, and cement nodules suggest that the apatite is authigenetically formed as a direct chemical precipitation and by replacing rare form. Chemically apatites of Pisco and Sechura are similar, and denote chlorine deficiency. The combination of data might serve as a model in the exploration for economic phosphates in Pisco and Sechura basins.

Keywords: Phosphate rock, oolite, authigenic, apatite, nodule, biogenic.

I. INTRODUCCIÓN

La presente investigación está orientada a analizar la composición geoquímica, mineralógica y la génesis de las fosforitas miocénicas para determinar su relación con el contenido económico de los fosfatos de Pisco y Sechura. El área de estudio comprende las secuencias sedimentarias superiores de las cuencas Pisco (13°-16°S) y Sechura (5°-7°S) respectivamente. Ambas cuencas miocénicas son relacionadas a zonas activas de subducción del tipo Benioff y arcos magmáticos (cuencas de Antearco). Figura N.º 1



Para el desarrollo de esta investigación se revisaron los trabajos publicados de Lisson (1898), Ruegg (1962), Cheney *et al.* (1979), Dávila (1988), McClellan (1989), Gallarday, (2009), Bech *et al.* (2010); y otras investigaciones realizadas sobre la génesis de las fosforitas neógenas a lo largo del Pacífico Este (Böning, 1973; Glenn y Arthur, 1988; Garrison y Kastner, 1990; Garrison, 1992 y Arning *et al.* 2009).

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Un total de 26 muestras de rocas fosfáticas representativas de Pisco y Sechura fueron analizadas en los laboratorios de CIMM Perú para la determinación de 11 óxidos mayores por fusión de metaborato de Litio, 7 elementos traza y 4 tierras raras por ICP-MS. La mineralogía fue determinada petrográficamente en 20 láminas delgadas, se utilizó el microscopio MELJI TECHNO ML9430. Los minerales identificados fueron verificados por Difracción de Rayos X – DRX, con el equipo SHIMADZU modelo XRD-6000. Los estudios de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y los análisis de elementos mayores semi-cuantitativos fueron realizados en ocho muestras utilizando el equipo Quanta 200+EDX de la marca FEI (Figura N.º 2).

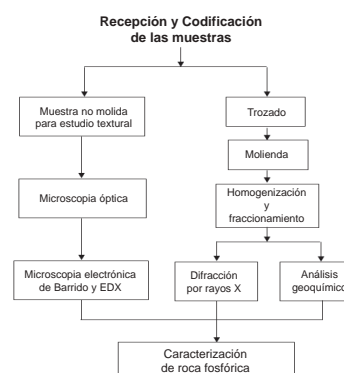


Figura N.º 2. Flujograma utilizado para la caracterización de las rocas fosfáticas de Pisco y Sechura (Adaptado de IFDC, 2010).

2.1 Contexto geológico

2.1.1 Cuenca Pisco

La geología regional se caracteriza por la predominancia de rocas precámbricas, y de batolitos paleozoicos, recubiertos por sedimentos marinos y continentales que abarcan desde el Paleozoico al Cenozoico (Figura N.º 3). Las rocas fosfáticas estudiadas ocurren dentro de la Formación Pisco de edad Mioceno a Plioceno (Petersen, 1954; Macharé *et al.* 1987; Dumbar *et al.* 1988 y 1990; Dávila *et al.* 1989; Fernández Dávila, 1993; Montoya *et al.* 1994; De Vries, *et al.* 1997 y 1998; León *et al.* 2005 y 2008), se estima un espesor en subsuelo de 815 m (Pisco 4x-1). Estructuralmente se ha desarrollado en un contexto tectónico extensional, dominado por un sistema de fallas normales de rumbo noroeste, que ha originado la formación de numerosos grábenes entre Paracas y San Juan de Marcona (León *et al.* 2005).

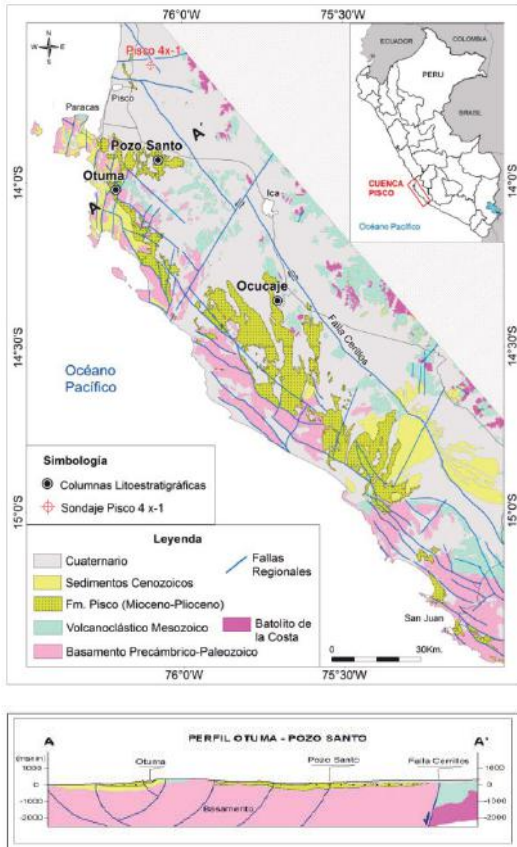


Figura N.º 3. Geología generalizada de la cuenca Pisco.

2.1.2 Características de las Rocas Fosfáticas de Pisco

Las rocas fosfáticas de Pisco predominan en la sección media (Pozo Santo) de la secuencia estratigráfica de la Formación Pisco, algunas formas restringidas fueron identificadas hacia la base (Otuma) y techo (Ocucaje) respectivamente. Se caracterizan por ser capas friables de poco espesor con altos contenidos fosfáticos. Litológicamente consisten en areniscas, lodolitas biogénicas, limolitas arenosas a diatomáceas y areniscas tufáceas, intercaladas con una serie de areniscas ligeramente fosfáticas, fosforitas y conglomerados fosfáticos (Figuras N.º 4 y 5).

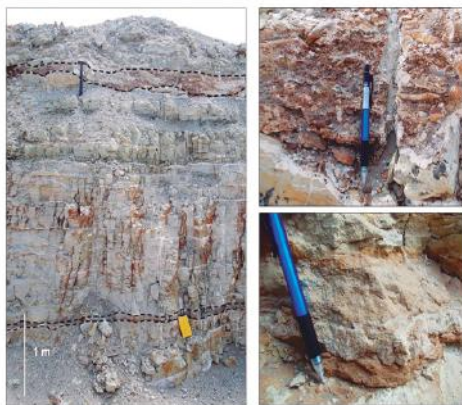


Figura N.º 4. Fosforitas sector Pozo Santo.

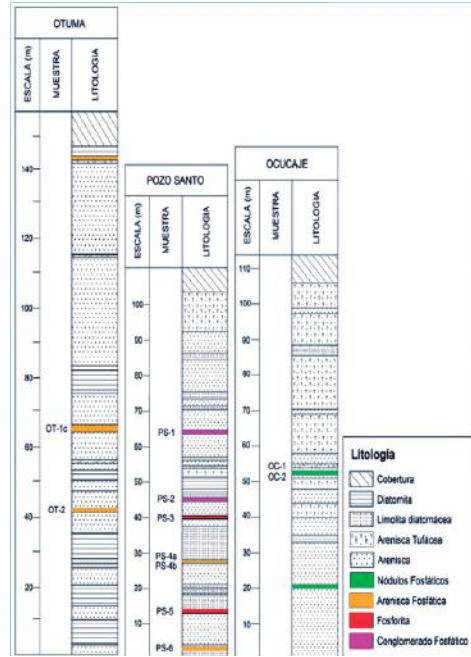


Figura N.º 5. Columnas litoestratigráficas sectores Otuma, Pozo Santo y Ocucaje.

2.1.3 Cuenca Sechura

El contexto geológico regional corresponde a rocas del basamento precambriano y rocas paleozoicas recubiertos por sedimentos de ambientes marinos y continentales del rango de edades Mesozoico al Cenozoico (Figura N.º 6). Las rocas fosfáticas de Sechura.

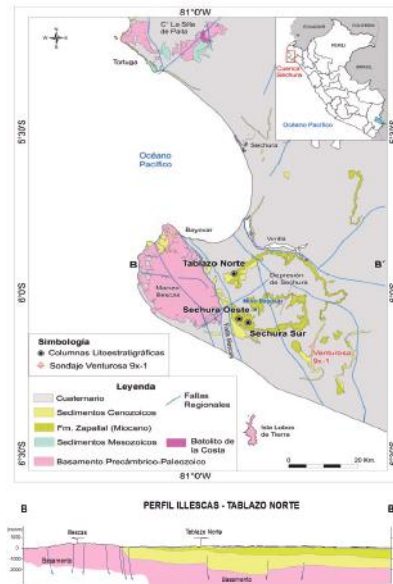


Figura N.º 6. Geología generalizada de la cuenca Sechura. Ocurren en los sedimentos marinos de la Formación Zapallal de edad Mioceno medio a superior (Mac Donald *et al.* 1956; Palacios, 1979; Caldas *et al.* 1980; Villavicencio, 1987 y Chapilliquen *et al.* 2014), se estima un espesor de subsuelo de 700 a 970 m. El estilo de deformación de la cuenca Sechura consiste en una tectónica de bloques fallados a escala regional, que han intervenido en la evolución y configuración de dicha cuenca sedimentaria (Vela, 1979 y Caldas *et al.* 1980).

2.1.4 Características de las rocas fosfáticas de Sechura

Las rocas fosfáticas de Sechura comprenden entre 135 a 215 m, de los estratos superiores de la Formación Zapallal. Litológicamente consisten en una serie de intercalaciones de fosforitas friables (marrón claro a negro) y diatomitas blandas (blancas a grises), y una transición entre ambos denominados intercapas; también se evidencian algunas capas de areniscas y tufo grises, considerados guías estratigráficas en las correlaciones de campo. Dentro de estos estratos han sido identificadas tres zonas fosfáticas principales (Cheney *et al.* 1979): a) La zona fosfática Diana en el miembro diatomita y fosforita inferior (Sechura Sur y Tablazo Norte), b) La zona Cero (Tablazo Norte), y c) La zona fosfática Minerva en el miembro diatomita y fosforita superior (Sechura Oeste). Figuras N.º 7 y 8.

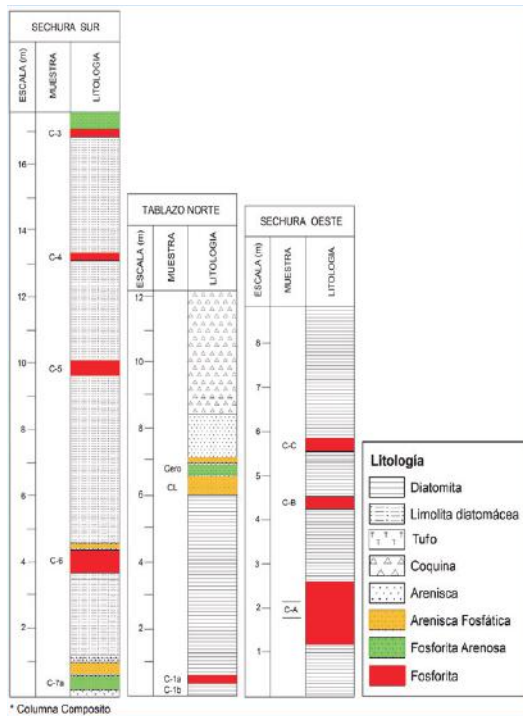


Figura N.º 7. Columnas Litoestratigráficas Sechura Oeste-Sur y Tablazo Norte.

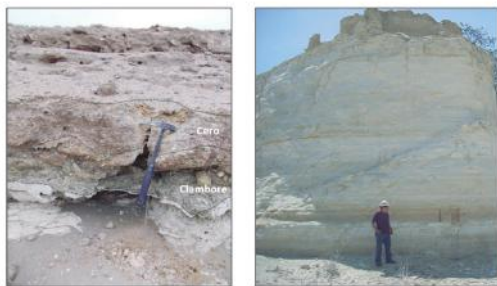


Figura N.º 8. (Izquierda) Zona Cero. (Derecha) Fosforitas sector Tablazo Norte.

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1 Geoquímica de elementos mayores, traza y tierras raras

Como primer intento clasificatorio de las rocas fosfáticas de Pisco y Sechura, se utilizó el diagrama ternario de óxidos mayores PSF (adaptado de Glenn y Arthur, 1988), permitiendo discriminar las rocas fosfáticas con alto contenido de apatito (símbolo rojo), moderado apatito (símbolo verde) y bajo apatito (símbolo celeste). Figura N.º 9. Los valores recalculados PSF fueron considerados de la Tabla N.º 1 basado en los siguientes parámetros .P: $P_2O_5+CaO+Na_2O$; S: $SiO_2+Al_2O_3+K_2O$ y F: Fe_2O_3+MgO , expresados en (%).

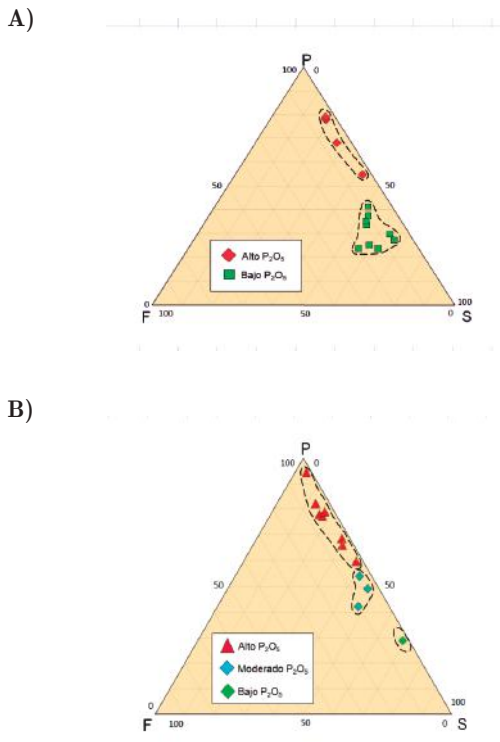
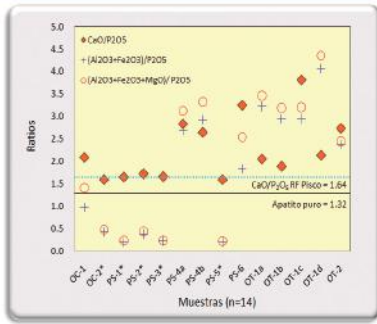


Figura N.º 9. Diagrama Ternario de óxidos mayores PSF (adaptado de Glenn & Arthur, 1988). A. RF Pisco. B. RF Sechura.

Los ratios geoquímicos: CaO/P_2O_5 , $(Al_2O_3+Fe_2O_3)/P_2O_5$ y $(Al_2O_3+Fe_2O_3+MgO)/P_2O_5$ (Tabla N.º 1) determinaron características favorables de concentración en las rocas fosfáticas de Pisco con altos tenores de P_2O_5 (n=5), siendo sus ratios promedio: 1.6, 0.3 y 0.3 respectivamente. En Sechura las rocas fosfáticas con altos tenores de P_2O_5 (n=8), presentan ratios promedio: 1.8, 0.2 y 0.3. La presencia de carbonatos en algunas rocas fosfáticas de Sechura incrementa el ratio promedio CaO/P_2O_5 con respecto a Pisco. Bajos contenidos de Al, Fe y Mg, en dichas rocas fosfáticas disminuyen considerablemente los otros ratios geoquímicos en mención (Figura N.º 10).

C)



D)

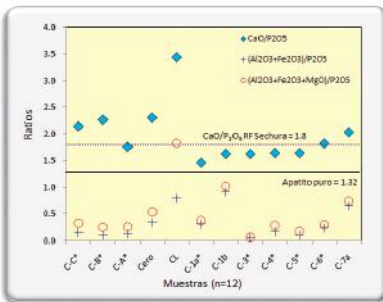
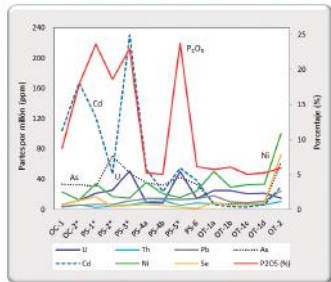


Figura N.º 10. Comparación de ratios geoquímicos con respecto al apatito puro. C. RF Pisco. D. RF Sechura.

Algunas rocas fosfáticas de Pisco presentan mayores concentraciones de elementos traza en orden decreciente de abundancia Cd, As, U, Se, Th. En Sechura las mayores concentraciones incluye U, As, Cd, Se (Figura N.º 11, Tabla N.º 2). En general presentan empobrecimiento de elementos traza Pb, Ni y tierras raras Ce, La, Y, Yb (Figura N.º 12, Tabla N.º 2).

E)



F)

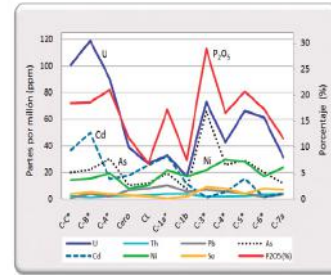
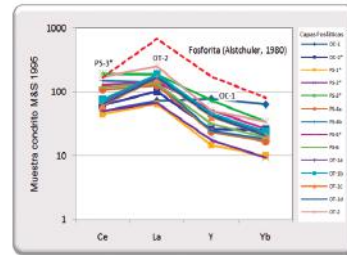


Figura N.º 11. Gráfico de variabilidad del P2O5 en relación a elementos traza. E. RF Pisco. F. RF Sechura.

G)



H)

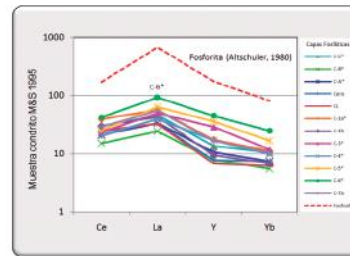


Figura N.º 12. Gráfico de variabilidad de tierras raras normalizadas a condritos (McDonought & Sun, 1995) en relación al contenido normal en fosforitas (Alstchuler, 1980). G. RF Pisco. H. RF Sechura.

Tabla N.º 1. Concentración de elementos mayores y ratios geoquímicos

	RF Pisco (14)														RF Sechura (12)										RF* Alto P2O5			
	OC-1	OC-2*	PS-1*	PS-2*	PS-3*	PS-4a	PS-4b	PS-5*	PS-6	OT-1a	OT-1b	OT-1c	OT-1d	OT-2	RF* Alto P2O5	C-C*	C-B*	C-A*	Cero	CL	C-1a*	C-1b	C-3*	C-4*		C-5*	C-6*	C-7a
P2O5	8.8	17.9	23.6	18.6	22.9	5.3	5	23.8	6.1	5.7	6	5	5.3	5.9	21.4	18.5	18.7	21	11.8	6.9	17.3	7.6	28.9	16.5	20.7	17.3	11.7	19.9
Fe2O3	2.2	1.8	1.7	2.5	2.2	3	3.2	1.7	3.1	11.5	10.1	8.4	15	7.7	2	0.8	0.6	0.8	0.8	0.9	0.7	0.9	0.8	1	1	1.1	2.1	0.9
MgO	3.8	0.8	1.2	1.2	0.5	2.3	2	0.7	4.4	1.4	1.5	1.3	1.5	0.4	0.9	3.4	2.9	2.9	2.3	7.1	1.1	0.8	0.6	1.9	1.5	1	1.1	1.9
CaO	18.3	28.4	38.9	31.9	38.0	14.9	13.2	37.7	19.9	11.7	11.4	19.1	11.2	16.2	35	39.6	42.3	37.1	27.2	23.6	25.3	12.4	47.1	27.3	34	31.6	23.8	35.5
Al2O3	6.4	5.9	2.8	4.5	2.9	11.1	11.5	2.9	8.1	6.8	7.6	6.3	6.4	6.3	3.8	2	1.3	1.9	3.2	4.6	4.8	6	0.6	1.8	1.2	3.2	5.5	2.1
MnO	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
SiO2	30.4	30.2	12	16.1	11.1	40	41	11.1	31	38.9	43.7	34.3	37.6	29.8	16.1	10.1	8.3	11.4	34.3	29.8	22.3	47.5	2.5	20.8	12.2	19.0	25.7	13.3
TiO2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.4	0.5	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1
BaO	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Na2O	3.8	2.9	2.4	2.8	1.6	4.3	3.8	2.7	2.5	3.2	3.1	2.5	3.2	2.7	2.5	0.8	0.9	1.2	1.3	1.5	4.7	3.5	2.2	6.8	6.8	5.2	5.8	3.6
K2O	1.3	1.9	0.6	0.5	0.4	1.4	1.4	0.5	1.1	2.8	3.1	2.3	2.7	1.3	0.8	0.3	0.2	0.3	1.3	1.6	2.9	2.7	0.1	0.5	0.4	0.4	1	0.6
LOI	17.6	7.6	14	12.1	9.1	11.1	10	11	18	10.9	9.9	15.8	10.9	13.2	10.8	16.2	16.5	13.7	13.6	21	12.1	11.3	11.4	20.1	18.3	15.1	14.3	15.4
TOTAL	92.8	97.8	97.5	90.6	89	94	91.7	92.3	94.8	93.2	96.8	95.4	94.1	83.9	-	91.9	91.7	90.4	95.9	97.2	91.3	93	94.5	96.9	96.2	94	91.2	-
CaO/P2O5	2.1	1.6	1.6	1.7	1.7	2.8	2.6	1.6	3.3	2.1	1.9	3.8	2.1	2.7	1.6	2.1	2.3	1.8	2.3	3.4	1.5	1.6	1.6	1.6	1.8	2	1.8	
(Al2O3+Fe2O3)/P2O5	1	0.4	0.2	0.4	0.2	2.7	2.9	0.2	1.8	3.2	2.9	3.0	4.1	2.4	0.3	0.2	0.1	0.1	0.3	0.8	0.3	0.9	0.1	0.2	0.1	0.2	0.7	0.2
(Al2O3+Fe2O3+MgO)/P2O5	1.4	0.5	0.2	0.4	0.2	3.1	3.3	0.2	2.5	3.5	3.2	3.2	4.4	2.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.5	1.8	0.4	1.0	0.1	0.3	0.2	0.3	0.7	0.3

Todas las composiciones de óxidos mayores se representan en (%). Hierro Total reportado como Fe2O3. Pérdida por calcinación (siglas en inglés LOI) a 1,000°C. El valor promedio corresponde a la media aritmética de las *rocas fosfáticas (RF) con altos contenidos de P2O5.

Tabla N.º 2. Concentración de elementos traza y tierras raras

	Pisco (n=14)														Promedio		Sechura (n=12)							Promedio		Promedio Fosforita (Altschuler, 1980)			
	OC-1	OC-2*	PS-1*	PS-2*	PS-3*	PS-4a	PS-4b	PS-5*	PS-6	OT-1a	OT-1b	OT-1c	OT-1d	OT-2	RF Pisco	C-C*	C-B*	C-A*	Cero	CL	C-1a*	C-1b	C-3*	C-4*	C-5*		C-6*	C-7a	RF Sechura
U	6.8	12	21.5	25.7	50.6	9.7	8.9	50.4	14.4	25.3	25.2	20.6	21.5	14.9	22	101	119	90.4	39.0	26.8	32.9	17.1	73.1	42.4	66.5	61.3	31.6	58.4	120
Th	4.4	6	2.5	4	6.2	10.1	11.9	5.3	8.8	7.5	7.8	5.9	6.1	10.4	6.9	2.4	1.3	2.1	2.6	3.1	4	4	1.9	1.8	2.3	3.8	3.9	2.8	7
Pb	3.1	5.9	7	7	11.1	14.6	14.5	12.9	14.5	18.1	10.1	8.9	11.4	24.6	11.7	0.8	4.1	2	6.8	8.1	10.3	5.5	7.1	5.7	4.3	1.7	3.5	5	50
As	33.4	32.8	30.8	70.4	48.6	35.1	31.7	42.9	33.5	8.6	7.4	7.7	8	62.1	32.4	20.2	22.1	30.3	10.3	12	19.5	7.8	66.1	25.9	29.0	20.2	11.7	22.9	23
Cd	104	167	122	46.9	230	53.1	23.8	54.6	38.1	6	3.5	3.1	5.9	30.4	63.5	36.9	50.0	15.1	17.7	25.3	32.3	11.3	1.3	5.4	15.4	1.5	4.2	18	18
Ni	23	12.4	33.6	17	15.3	35.8	20.4	15.7	24.6	50.5	29.6	32.4	33.4	100.1	31.7	14.2	15.2	19.5	8.1	10.5	21.8	17.2	21.8	29.8	28	17.2	23.8	18.9	53
Se	7	12	17	4	5	7	5	3	1	9	6	7	9	72	11.7	4	5	4	3	2	0.5	2	9	8	4	8	7	4.7	5
Ce	30.7	38.1	27.3	30.4	117	66.3	91	78	72.7	43.1	45.3	37.5	39.1	104.4	58.6	18.1	9.3	13	14.7	15.3	24.2	18.5	14.4	12.5	15.3	25.8	17.8	16.6	104
La	17.2	23.9	15.3	15.9	44.5	29.6	33.2	33.6	31.5	42.0	44.2	38.2	39.3	59.9	33.5	11	5.8	8	7.9	7.7	13.5	10.2	11.7	9.4	15	22.1	13	11.3	160
Y	122	40.1	22.9	27.3	115	36.8	38.4	81.3	49.5	68.1	70.9	63.8	66.2	79.5	63.0	21.4	12.4	16.7	12.2	10.7	27.4	14.9	45.6	26.9	56.3	70.9	26.4	28.5	275
Yb	10.2	4.1	1.6	1.5	5.5	2.7	2.9	4.2	3.1	3.6	3.8	3.3	3.3	5.5	4	1.7	0.9	1.2	1.2	1.0	1.8	1.1	1.9	1.6	2.7	4.0	1.7	1.7	13

Todas las composiciones de elementos Traza se presentan en (ppm). * Rocas Fosfáticas (RF) con altos contenidos de P2O5. El valor promedio corresponde a la media aritmética de las rocas fosfáticas estudiadas.

3.2 Petrografía Microscópica

El material fosfático reconocido en láminas delgadas consiste principalmente en oolitas, pelets e intraclastos; la mayoría están en el rango 0.1 a 0.8 mm. El material ce-

mentante consiste en carbonatos, colofano, limo, arcillas, yeso, anhidrita, restos biosilíceos y extraclastos de rocas ígneas. (Figura N.º 13, Tabla N.º 3).

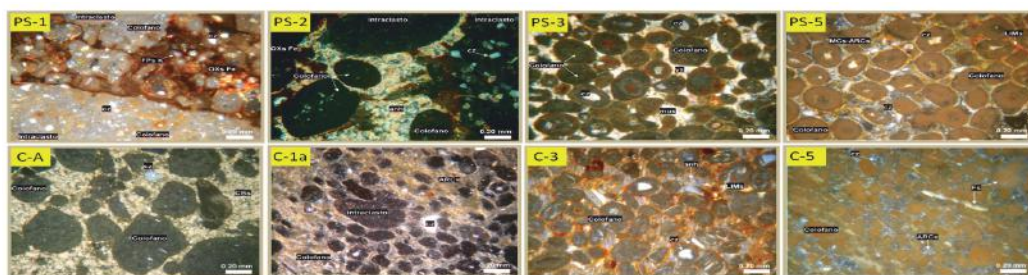


Figura N.º 13. Fotomicrografías rocas fosfáticas de Pisco: PS-1) y PS-2) Conglomerado fosfático clasto y matriz soportado. PS-3) y PS-5) Fosforita oolítica tamaño arena media. Rocas fosfáticas de Sechura: C-A) Fosforita intraclástica tamaño arena gruesa. C-1a), C-3) y C-5) Fosforita oolítica tamaño arena media. (Nicoles cruzados 40x).

Tabla N.º 3. Resumen del análisis petrográfico

MUESTRA	RF Pisco (n=9)											RF Sechura (n=11)										
	ARMAZON (%)						MATRIZ (%)	CEMENTO (%)	CLASIFICACION		MUESTRA	ARMAZON (%)						MATRIZ (%)	CEMENTO (%)	CLASIFICACION		
	CL	T	I	E	CB	AC			Modificado Hallsworth & Knox (1999)	Garrison & Kastner (1990)		CL	T	I	E	CB	AC			Modificado Hallsworth & Knox (1999)	Garrison & Kastner (1990)	
OC-1	4	N.I	N.I	56	3	5	32	N.I	Conglomerado ligeramente fosfático tamaño gránulo, matriz detritica.	--	C-C	8	4	34	N.I	3	1	N.I	50	Fosforita intraclástica tamaño arena media, cemento carbonatado.	Fosfatos "Tipo P"	
OC-2	N.I	42	N.I	2	2	3	N.I	51	Nódulo fosfático conformado por granos detriticos, cemento de colofano y micas.	Fosfatos Tipo "D"	C-B	10	6	33	N.I	3	N.I	N.I	48	Fosforita intraclástica tamaño arena media, cemento carbonatado.	Fosfatos "Tipo P"	
PS-1	15	N.I	65	N.I	3	5	12	N.I	Conglomerado fosfático tamaño arena muy gruesa a pebble, matriz de colofano.	Fosfatos Tipo "D"	C-A	10	5	44	N.I	3	N.I	N.I	38	Fosforita intraclástica tamaño arena gruesa, cemento carbonatado.	Fosfatos "Tipo P"	
PS-2	14	N.I	55	N.I	2	6	N.I	23	Conglomerado fosfático tamaño pebble, cemento de anhídrita y arcillas.	Fosfatos Tipo "D"	Cero	N.I	8	41	24	3	N.I	N.I	24	Conglomerado ligeramente fosfático tamaño arena muy gruesa a pebble, cemento carbonatado.	--	
PS-3	70	6	N.I	N.I	2	2	N.I	20	Fosforita oolítica tamaño arena media, cemento de yeso y muscovita.	Fosfatos "Tipo P"	CL	2	8	24	11	2	1	N.I	52	Conglomerado ligeramente fosfático tamaño arena muy gruesa a pebble, cemento carbonatado.	--	
PS-5	82	4	N.I	N.I	4	4	6	N.I	Fosforita oolítica tamaño arena media, matriz de micas y arcillas.	Fosfatos "Tipo P"	C-1a	37	7	7	N.I	1	N.I	48	N.I	Fosforita oolítica tamaño arena media, matriz de arcillas y limos.	Fosfatos "Tipo P"	
PS-6	28	16	N.I	N.I	2	7	N.I	47	Arenisca fosfática tamaño arena media, cemento carbonatado	--	C-1b	14	22	2	N.I	1	1	60	N.I	Lutita limosa arcillosa ligeramente fosfática.	--	
OT-1c	10	13	N.I	8	0.5	30.5	8	30	Arenisca glauconítica ligeramente fosfática tamaño arena gruesa, cemento de carbonatos y arcillas.	--	C-3	60	4	N.I	N.I	2	4	2	28	Fosforita oolítica tamaño arena media, matriz cementado por anhídrita.	Fosfatos "Tipo P"	
OT-2	18	35	N.I	15	3	7	2	20	Arenisca ligeramente fosfática tamaño arena fina, cemento de yeso	--	C-4	44	4	5	N.I	2	1	44	N.I	Fosforita oolítica tamaño arena media; matriz de arcillas, micas y carbonatos.	Fosfatos "Tipo P"	
											C-5	60	5	4	N.I	4	2	25	N.I	Fosforita oolítica tamaño arena media; matriz de de arcillas, micas y carbonatos.	Fosfatos "Tipo P"	
											C-6	30	8	10	N.I	3	N.I	7	42	Fosforita oolítica tamaño arena media, matriz cementada por anhídrita y yeso.	Fosfatos "Tipo P"	

Todas las composiciones expresados en porcentaje (%). Minerales menores a 0.5% son considerados Trazas. N.I : Minerales No Identificados
Abreviaturas: CL: Colofano, T: Terrigenos, I: Intraclasto, E: Extraclasto, CB: Contenido Biogénico, AC: Minerales Accesorios.

3.3 Difracción de Rayos X-DRX

Los resultados del análisis de roca total y algunas muestras orientadas (matriz de la roca) revelan la existencia de concentraciones variables de fluorapatito y en forma más rara la presencia de hidroxipatito (Tabla N.º 4); ambas ocurren principalmente como partículas clásticas, a veces como cemento; otros componentes de las partículas

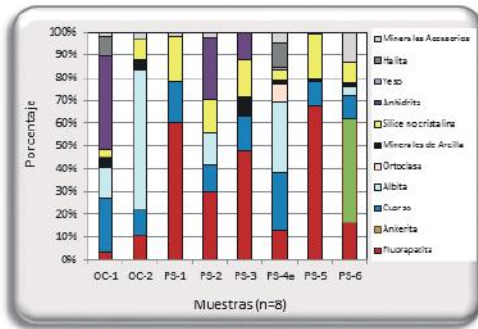
son cuarzo, albíta, ortoclasa y halita. El material cementante está conformado por calcita, ankerita, dolomita, anhídrita, yeso, síliceno cristalina (principal componente en las diatomitas puras), y minerales arcillosos principalmente muscovita y esmectitas. Los minerales accesorios más comunes son augita, hastingsita, glaucofana, clorita, epidota y biotita (Figura N.º 14).

Tabla N.º 4. Resultados del análisis por difracción de rayos X

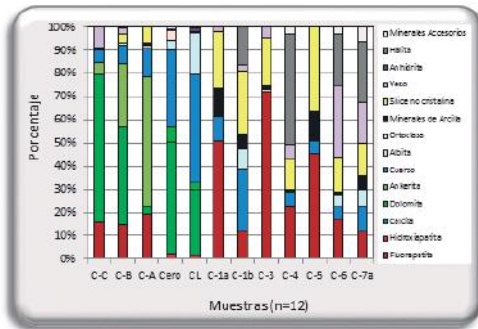
Mineralogía	RF Pisco (n=8)								RF Sechura (n=12)											
	OC-1	OC-2	PS-1	PS-2	PS-3	PS-4a	PS-5	PS-6	C-C	C-B	C-A	Cero	CL	C-1a	C-1b	C-3	C-4	C-5	C-6	C-7a
Fluorapatita	3.3	10.8	60	30.1	47.9	12.8	67.6	16	15.9	14.6	19.5	n.d	n.d	50.8	12.5	71.8	22.1	45.6	17	11.7
Hidroxiapatita	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	2.2	1.9	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
Calcita	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	63.5	42.5	3.1	48.1	27.9	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
Dolomita	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	6.5	3.1	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
Ankerita	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	45.8	5.3	27.2	55.7	n.d	n.d	n.d	n.d	0.5	n.d	n.d	n.d	n.d
Cuarzo	23.4	11	18	11.7	15.2	25.2	10.7	10.2	5.5	8	12.5	33.3	46.6	10.7	26.2	n.d	6.2	5.2	5.3	11.3
Albíta	14.3	61.6	n.d	13.9	n.d	31.4	n.d	4.2	n.d	0.6	n.d	3.8	18.4	n.d	8.5	n.d	n.d	n.d	4.8	6.6
Ortoclasa	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	7.9	n.d	n.d	n.d	n.d	1.3	4.6	n.d	n.d	1.3	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
Minerales de Arcilla	0.0	0.0	n.d	n.d	8.5	0.0	0.0	1.7	0.9	n.d	0.9	0.5	0.2	12.3	6.7	2	0.9	12.5	1.9	6.4
Silíce no cristalina	3.7	9	20.3	14.9	16.5	4.9	19.5	9.2	n.d	4.2	7	n.d	n.d	24.6	27.0	19.9	13.7	36.7	14.6	13.9
Yeso	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	1.0	n.d	n.d	8.8	2.3	n.d	n.d	n.d	1.6	2.7	5.0	6.0	n.d	30.8	17.4
Anhídrita	40.6	n.d	n.d	27.1	11.9	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	1.4	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
Halita	8.9	n.d	n.d	n.d	n.d	10.7	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	16.4	n.d	n.d	47.9	n.d	22.5	26.2
Minerales Accesorios	0.0	0.0	0.0	0.0	n.d	4.8	0.0	12.9	n.d	0.5	n.d	1.1	0.5	n.d	n.d	n.d	2.9	n.d	3.1	6.5
									Minerales de Arcilla											
Muscovita	1.5	4.6	n.d	n.d	n.d	0.8	1.3	n.d	0.9	n.d	0.9	0.5	0.2	n.d	2.9	2	0.9	1.5	1.9	6.4
Montmorillonita	2.5	n.d	n.d	n.d	2.8	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	12.3	n.d	n.d	n.d	11.0	n.d	n.d
Beidellita	n.d	n.d	n.d	n.d	1.7	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	3.7	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
Caolinita	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	0.6	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
Heulandita	n.d	n.d	n.d	n.d	2.2	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
Sepiolita	n.d	n.d	n.d	n.d	1.9	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d

Todas las composiciones expresados en porcentaje (%). Identificaciones por DRX: n.d (No detectado)

I)



J)



3.4 Microscopia Electrónica de Barrido- MEB

Análisis con MEB en superficies de pequeños oolitos, intraclastos y cemento de nódulos fosfáticos, determinaron una composición química: O, Ca, P, Cl (Figura N.º 15, Tabla N.º 5), gráficamente dichos elementos presentan una tendencia bastante similar con respecto al apatito puro (Figura N.º 16). Altos contenidos de “O” representa el sustrato cristalino conformado por silicatos, sulfatos y otros minerales identificados en dichas RF. Los elementos ligeros “H” y “F” no fueron detectados debido a la baja sensibilidad del equipo EDS.

K)

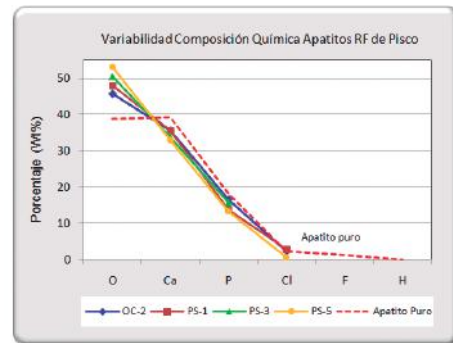


Figura N.º 14. Gráfico del contenido mineralógico en % determinado por DRX. I. RF Pisco. J. RF Sechura.

Tabla N.º 5. Composición química (Wt %) determinado por microscopia electrónica de barrido

Muestra	Material Analizado	RF Pisco (n=4)											Total Muestra	Material Analizado	RF Sechura (n=4)											Total				
		O	Ca	P	Si	Al	Fe	Na	Mg	K	Ti	Cl			C	S	O	Ca	P	Si	Al	Fe	Na	Mg	K		Ti	Cl	C	S
OC-2	Centro de Nódulo fosfático (areal)	46.2	16.8	7.6	14.8	3	2	3	1	1.6	n.d	2.8	n.d	1.3	100	Fosforita oolítica (areal)	47.3	15.7	5.3	8.3	2.9	1	1.6	4.3	0.6	n.d	0.4	12.1	0.5	100
	Borde cementante de apatito (puntual)	45.7	35.5	16.5	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	2.3	NA	NA	100	C-A Oolito Fosfatado (puntual)	50.0	34.5	15.2	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0.3	NA	NA	NA
PS-1	Conglomerado fosfático (areal)	41.4	26.5	12.3	5.7	n.d	1.7	3.1	2.8	0.9	n.d	4.2	nd	1.4	100	C-1a Fosforita oolítica (areal)	34.1	25.2	13.3	7.9	3.2	1.3	5.3	1.5	0.8	n.d	5.2	n.d	2.2	100
	Oolito fosfático (puntual)	48	35.5	13.7	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	2.8	NA	NA	100	C-1a Oolito Fosfatado (puntual)	36.6	40.3	18.2	NA	NA	NA	2.6	NA	NA	NA	2.5	NA	NA	100
PS-3	Fosforita oolítica (areal)	52.3	9.3	4.5	18	5.6	6.2	1.4	0.8	1.1	0.5	0.1	nd	0.4	100	C-3 Fosforita oolítica (areal)	49.3	26.7	8.6	2.5	0.8	n.d	1.6	1	n.d	n.d	0.8	n.d	8.8	100
	Oolito fosfático (puntual)	50.5	33.8	15.7	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	100	C-3 Oolito Fosfatado (puntual)	44.8	37.3	15.6	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	2.3	NA	NA	100
PS-5	Fosforita oolítica (areal)	52.9	15	5.6	14.2	4.4	2.6	2.1	1.3	1.1	0.5	0.3	nd	n.d	100	C-5 Fosforita oolítica (areal)	46.7	11.8	4.6	15.3	1.4	3	8.4	0.9	0.3	n.d	7.7	n.d	n.d	100
	Oolito fosfático (puntual)	53.1	33	13.3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0.6	NA	NA	100	C-5 Oolito Fosfatado (puntual)	48.5	34.1	17.3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	100

Los resultados de elementos químicos se presentan en porcentaje en peso (Wt %). n.d: no determinado. NA: No aplicable

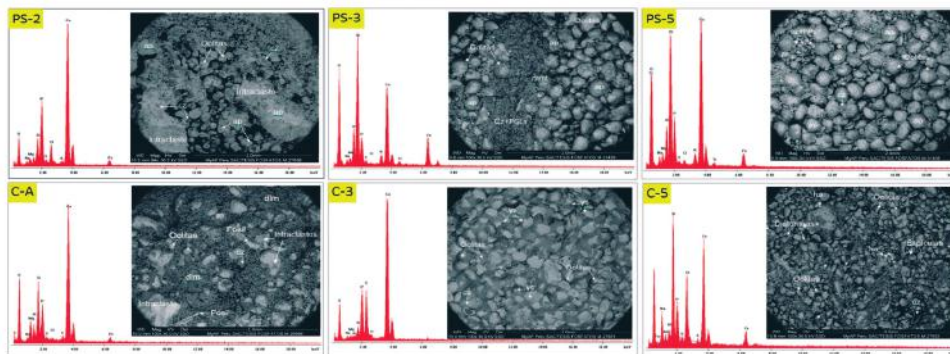


Figura N.º 15. Fotomicrografías determinadas por microscopia electrónica de barrido

L)

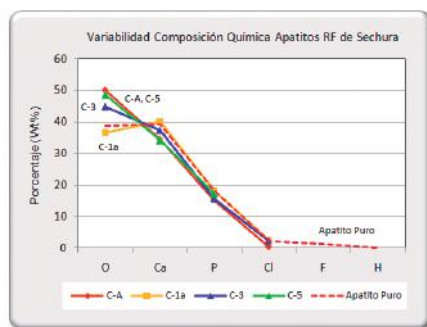


Figura N.º 16. Gráfico de variabilidad de la composición química (Wt %) de los apatitos de las RF de Pisco y Sechura en relación al apatito puro.

IV. CONCLUSIONES

1. Los resultados de la caracterización geoquímica, mineralógica y genética indican que las rocas fosfáticas de Pisco y Sechura provienen de una mezcla compleja de varios componentes terrígenos, autigénicos y biogénicos; su distribución espacial sugiere que su deposición fue controlada por la interacción de tres parámetros principales. a) Ambiente tectónico en actividad propicia para la formación de cuencas de antearco, b) Cambios paleoceanográficos y fluctuaciones en los patrones químicos a lo largo del margen oceánico, y c) La concentración de los componentes fosfáticos fueron afectados por el ratio local y volumen de la sedimentación, y aportes de actividad volcánica (cenizas).
2. De las 26 muestras analizadas, 13 constituyen rocas fosfáticas económicas (16.5 a 28.9% P_2O_5). Los ratios geoquímicos: CaO/P_2O_5 , $(Al_2O_3 + Fe_2O_3)/P_2O_5$ y $(Al_2O_3 + Fe_2O_3 + MgO)/P_2O_5$, en dichas muestras determinaron características favorables de concentración siendo los valores promedio 1.6, 0.3 y 0.3 para Pisco ($n = 5$) y 1.8, 0.2 y 0.3 para Sechura ($n = 8$). Algunas rocas fosfáticas de Pisco contienen mayores concentraciones en Cd, As, U, Se y Th. En Sechura se muestran las mayores concentraciones en U, As, Cd y Se. En general presentan empobrecimiento de Pb, Ni y tierras raras Ce, La, Y, Yb.
3. La mineralogía determinada mediante estudios petrográficos y verificados por DRX incluye fluorapatito, cuarzo, feldespato, sílice opalina (restos biosilíceos), calcita, ankerita, dolomita y menores contenidos de minerales de arcilla. Hidroxiapatito ocurre como mineral de apatito subordinado en Sechura. Petrográficamente las rocas fosfáticas económicas se clasifican en tres facies principales: a) fosforitas oolíticas (Pisco y Sechura), depositadas en ambientes de plataforma de alta energía dominado por oolitos fosfáticos que sugieren retrabajo después de su deposición, b) fosforitas intraclásticas (Sechura), dominado por intraclastos fosfáticos depositados en ambiente de plataforma carbonatada somera, y c) nódulos y conglomerados fosfáticos (Pisco), que suelen ocurrir durante los hiatos en la sedimentación controlados por movimientos tectónicos.

Análisis con MEB sugiere que los apatitos de Pisco y Sechura se formaron como una precipitación química directa y en forma más rara por reemplazamiento, químicamente denotan deficiencia en cloro.

4. Genéticamente existe una correlación entre las cuencas de Pisco y Sechura, y los contenidos económicos de P_2O_5 , cuyos valores se presentan entre 16.5 a 28.95%.

V. AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento a la empresa Vale Exploration Perú por permitir la realización y publicación de la presente investigación; al Ing. David Dávila, por sus aportes a este artículo; al Dr. Les Oldham, por facilitarme su microscopio petrográfico, y a la Dra. Gladys Ocharán por sus orientaciones durante los estudios de microscopía electrónica.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Altschuler, Z. S. (1980). The Geochemistry of trace elements in marine phosphorites part I. Characteristic abundances and enrichment. The Society of Economic Paleontologist and Mineralogists. Special Publication N.º 29, pp: 19-30.
2. Arning, E.T., Lückge, A., Breuer, C., Gussone, N., Birgel, D. & Peckmann, J. (2009). Genesis of phosphorite crusts off Peru. *Marine Geology*, Vol. 262, N.º 1-4, pp: 68-81.
3. Bech, J., Suarez, M., Reverter, F., Tume, P., Sanchez, P., Roca, N. & Lansac, A. (2010). Selenium and other trace element in phosphorites: A comparison between those of the Bayovar-Sechura and other provenances. *Journal of Geochemical Exploration*, Vol. 107, issue 2, pp: 146-160.
4. Böning, P. (1973). Trace element signatures of Peruvian and Chilean upwelling sediments: early diagenesis and environmental reconstructions. Doctoral thesis in Natural Sciences. Faculty of Mathematics and Natural Sciences University of Oldenburg, pp: 159.
5. Caldas, J., Palacios, O. & Pecho, V. (1980). Geología de los cuadrángulos de Bayovar, Sechura, La Redonda, Punta La Negra, Lobos de Tierra, Las Salinas y Mórrope. Ingemmet, Boletín. Serie A, *Carta Geológica Nacional*, N.º 32.
6. Chapilliquen, J., Tejada, L., Jaimes, F. & García, B. (2014). Diatomeas fósiles (Formación Zapallal, cuenca Sechura) y sus aplicaciones como elementos de correlación regional. Poster del XVII Congreso Peruano de Geología. Lima: Edit. Sociedad Geológica del Perú.
7. Cheney, T.M., McClellan, G.H. & Montgomery, E.S. (1979). Sechura Phosphate deposits, their stratigraphy, origin and composition. *Economic Geology*, Vol. 74, pp: 232-259.

8. Dávila, D. (1988). Ocurrencia de fosforitas y diatomitas en la cuenca de Pisco. Resúmenes del Simposium Nacional de Yacimientos Minerales de Petróleo y Fuentes de Energía, I, pp: 103. Universidad Nacional de San Agustín.
- 9) Dávila, D. (1989). Estratigrafía Cenozoica del valle del río Grande, Cuenca de Pisco - Perú. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, Vol. 80, pp: 65-76.
10. Devries, T. & Schrader, H. (1997). Middle Miocene marine sediments in the Pisco Basin (Peru). *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*. Vol. 87, pp: 13.
11. De Vries, T. (1998). Oligocene deposition and Cenozoic sequence boundaries in the Pisco Basin, Peru. *Journal of South American Earth Sciences*, Vol. 11, N.º 3, pp: 217-231.
12. Dunbar, R.B. & Baker, P.A. (1988). Cenozoic geology of the Pisco Basin; a guidebook to accompany a regional IGCP 156 field workshop: Genesis of Cenozoic phosphorites and associated organic-rich sediments, Peruvian continental margin. Houston, TX: Rice University. pp: 253.
13. Dunbar, R.B, Marty, R.C. & Baker, P.A. (1990). Cenozoic marine sedimentation in the Sechura and Pisco basin Peru. *Paleoceanography, Paleoclimatology, Paleoecology*, Vol. 77, pp: 235-261.
14. Fernández, M. (1993). Geología de los cuadrángulos de Pisco, Guadalupe, Punta Grande, Ica y Cordova. Ingemmet, Boletín. Serie A, *Carta Geológica Nacional*, N.º 47, pp: 63.
15. Gallarday, T. (2009). Fosfatos en la zona Ocucaje, sur de Ica – Perú. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, Lima, Vol. 12, N.º 24, pp: 33-42. <http://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/php/index.iigeo/article/view/353/310>
16. Garrison, R.&Kastner, M. (1990). Phosphatic sediments and rocks recovered from the Peru margin during ODP Leg 112. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Peru continental margin; covering Leg 112 of the cruises of the Drilling Vessel JOIDES Resolution, Callao, Peru to Valparaiso, Chile, sites 679-688, 20 October 1986-25 December 1986, Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results. 112, 111-134. College Station Texas A & M University, Ocean Drilling Program.
17. Garrison, R. (1992). Neogene Phospho genesis Along The Eastern Margin of the Pacific Ocean. *Revista Geológica de Chile*, Vol. 19, N.º 1, pp. 91-111.
18. Glenn, C.R. & Arthur, M.A. (1988). Petrology and major element geochemistry of Peru margin phosphorites and associated diagenetic minerals—authigenesis in modern organic-rich sediments. *Marine Geology*. Vol. 80, pp. 231-267.
19. International Fertilizer Development Center. 2010. *World phosphate rock reserves and resources*. Alabama, USA, pp. 44.
20. León, W., Aleman, A; De la Cruz, O & Rosell, W. (2005). Elementos estructurales y evolución tectónica-sedimentaria de la cuenca Pisco Oriental - Antearco Peruano. *Resúmenes del XII Congreso Latinoamericano de Geología*. Quito: Edit. Colegio de Ingenieros Geólogos, de Minas, Petróleos y Ambiental, pp. 5.
21. León, W., Aleman, A., Rosell, W. & Torres, V. (2008). Estratigrafía, sedimentología y evolución tectónica de la cuenca Pisco oriental. Ingemmet, *Boletín*. Serie D, Estudios Regionales, N.º 27, pp: 1-154.
22. Lissou, C. (1898). Los fosfatos de Ocucaje. *Boletín de Minas, Industrias y Construcciones*, Lima, N.º 14:5, pp:33-34.
23. Mac Donald, G. H. (1956). Miocene of the Sechura Desert, Piura. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, Vol. 30, pp: 225-242.
24. Macharé, J. & Fourtanier, E. (1987). Datation des formations tertiaires du bassin de Pisco (Pérou) a partir d'associations de diatomées. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, Vol. 305, N.º 5, pp: 407-412.
25. McDonough, W.F. & Sun, S. (1995). The composition of the Earth. *Chemical Geology*, Vol. 120, pp: 223-253.
26. McClellan, G. H. (1989). Geology of the phosphate deposits at Sechura, Peru. in *Phosphate deposits of the world*, Vol. 2. Phosphate rock resources. Edited by Notholt, A.J.G., Sheldon, R.P. and Davidson, D.F. Cambridge University Press. pp: 566.
27. Montoya, M., García, W. & Caldas, J. (1994). Geología de los cuadrángulos de Lomitas, Palpa, Nasca y Puquio. Ingemmet, *Boletín*, N.º 53,. Serie A, Carta Geológica Nacional, pp: 100.
28. Palacios, O. (1979). *Estudio geológico de Bayovar. Geología del noroeste del Perú escala 1:500, 000*. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Dirección General de Geología, Lima, Vol. 1, pp:97.
29. Petersen, G. (1954). Informe preliminar sobre la geología de la faja costanera del departamento de Ica. Empresa Petrolera Fiscal, *Boletín Técnico* N.º 1. pp: 33-77.
30. Ruegg, W. (1962). *Los depósitos fosfatados de Nazca*. Monografía, Ingemmet, pp: 5.
31. Villavicencio, E. (1987). *Microfósiles silíceos de la Formación Zapallal en la cuenca Sechura, área La Mina, Piura*. Ingemmet, pp: 1-19.
32. Vela, CH. (1979). Tectónica de la región Bayovar – Noroeste peruano. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, Vol. 63, pp: 249-262.