

NODULOS OPALINOS EN FACIES MARGINALES DEL SALAR OLAROSZ (PUNA ARGENTINA)

M. A. Bustillo* y R. Alonso**

RESUMEN

Se realiza un estudio petrológico y geoquímico de los nódulos silíceos que se encuentran incluidos en sedimentos terrígenos cuaternarios de la Cuenca de Olaroz (La Puna, Argentina). Estos nódulos se localizan en abanicos aluviales que aparecen encajados, debido a los cambios en el nivel de base que se produce desde el Pleistoceno a la actualidad, durante la evolución de los cuerpos lacustres a salares.

Un estudio mediante DRX revela que son rocas constituidas por ópalo C-T, con un espaciado (101) a 4,11 Å, que implica un grado de desorden alto, típico de las rocas silíceas formadas en superficie y que no han sufrido enterramiento ni influencia térmica. Su composición química es anómala si se compara con rocas silíceas continentales formadas en ambiente endorreico y fuera de un marco volcánico (Mioceno de la Cuenca del Tajo).

No poseyendo características de silcretas y no estando asociadas a la sedimentación evaporítica de los salares, se considera la influencia de aguas termales. La contaminación local y en un momento dado de las aguas freáticas de los abanicos aluviales por aguas termales ricas en sílice, propiciaría junto con la evaporización la precipitación de la sílice. Los nódulos silíceos crecerían desplazando el sedimento terrígeno que constituye la roca caja o reemplazando nódulos previa de ulexita.

Palabras clave: *Nódulos ópalo C-T, aguas termales, abanicos aluviales, salares.*

ABSTRACT

This article reports the results of a petrological and geochemical study of silica nodules from Quaternary alluvial fans of the Olaroz Salar. The nodules are mainly constituted by C-T opal, d. (101) spacing to 4,11 Å, implying a high-disorder; this is commonly observed in opal rocks formed in near surface environments, without burial and heating. The chemical composition of the nodules is anomalous when compared with other typical silica-rocks formed in arid continental closed basin, without any eruptive environments (for instance the Cuenca del Tajo in Spain).

The siliceous nodules do not have the characteristics of the silcretas and are not associated to the evaporitic facies of the salar. Their genesis is probably related to contamination of groundwater of the alluvial fan with high-silica thermal water. The C-T opal would thus precipitate by either displacing the terrigenous host-rock or replacing previous ulexite nodules.

Key words: *Nodules of C-T opal, high-silica thermal water, alluvial fans, salt-lakes.*

Introducción

Nódulos silíceos de especiales características han sido encontrados en sedimentos cuaternarios que rodean la cuenca evaporítica del salar Olaroz en la Puna (Rep. Argentina). Se trata de la primera mención de nódulos de esta naturaleza, a pesar que en la Puna hay numerosas cuencas evaporíticas con igual evolución y relleno sedimentario.

El objetivo fundamental de este trabajo es la caracterización petrológica y geoquímica de estos nódulos silíceos, casi actuales, y va enfocado a intentar conocer su génesis y las causas de su emplazamiento. Se considera que en la formación de los nódulos deben haber concurrido factores específicos de la cuenca de Olaroz ligados al ambiente árido, endorreismo y marco volcánico regional con aportes de aguas termales.

* Departamento de Geología. MNCN, José Gutiérrez Abascal, 2, 28006-Madrid.

** Departamento de Geología. Facultad de Ciencias Naturales. UNSAT. Salta (Argentina).

Por otra parte se plantea un análisis comparativo de los nódulos silíceos de Olaroz, con otras rocas silíceas miocenas de la cuenca del Tajo (España), formadas en un régimen continental endorreico, con etapas áridas, pero sin ninguna relación con ambiente volcánico.

Marco geológico, localización y características de los nódulos silíceos

La Puna es la terminación austral del Altiplano Sudamericano, el mayor «plateau» desarrollado en márgenes continentales no colisionales. Es un región elevada unos 4000 m sobre el nivel del mar, con un clima árido, limitada en su parte occidental por un frente volcánico y en la oriental por un frente tectónico (Alonso et al., 1984). En su interior se desarrollan numerosas cuencas endorreicas debido al cierre que producen las serranías estratovolcánicas y que, a causa del clima, presentan grandes extensiones evaporíticas (salares). En las zona de borde, al pie de los relieves circundantes, existen facies detríticas constituidas por coluviones y partes proximales de abanicos aluviales, que pasan lateralmente a facies de playa arenosas y fangosas y por último a facies evaporíticas en las áreas centrales de la cubeta de sedimentación.

La presencia de sistemas de abanicos encajados, que se manifiestan en el paisaje por la existencia de escarpes aterrazados (fig. 1), son el reflejo de cambios del nivel de base en el marco de la evolución desde el Pleistoceno a la actualidad, en la que cuerpos lacustres se han transformado en salares por desecación progresiva.

Los nódulos silíceos se encuentran situados en el camino que une las localidades de Susques y Coranzulí en la región de la Puna de Jujuy. Se localizan en la parte media de una sección de unos 6 metros de espesor formada por cuerpos lenticulares de gravas y arenas sueltas con estratificación cruzada, y que se apoya en discordancia angular sobre sedimentos clásti-



Fig. 1.—Perfil esquemático de los sedimentos de la cuenca de Olaroz.

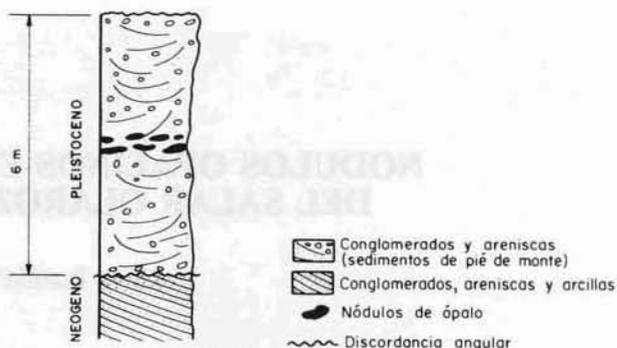


Fig. 2.—Sección del nivel «aterrazado» donde se encuentran los nódulos opalinos y aspecto de estos nódulos en el afloramiento.

cos del Terciario Superior (Fig. 2). El material terrígeno que contiene los nódulos es de carácter heterométrico y anguloso, compuesto por un esqueleto de clastos de pizarras y grauvacas, y una matriz areno-limosa rojiza. Corresponde a materiales de facies proximales de abanicos aluviales, los cuales presentan una acentuada porosidad y permeabilidad.

Los nódulos presentan tamaños variables, siendo más abundantes los de 5 y 10 cm, alcanzando en ocasiones hasta 20 cm (fig. 2). Son de fuerte color blanco en corte fresco. Su superficie irregular (fig. 3) está frecuentemente teñida de color rojizo claro, que es el tono de los sedimentos clásicos que los incluye. Su forma es muy variable estando normalmente aplastados en el sentido de la estratificación. Se disponen en niveles, que se distribuyen irregularmente en una franja de unos 2 metros de espesor y en la cual representan el 30% de la sección visible. Son compactos, frágiles y de baja densidad. Son suaves al tacto y en corte fresco muestran una gran capacidad de absorción de agua, teniendo las mismas propiedades órgano-lépticas que la sepiolita, mineral este último con el cual pueden confundirse fácilmente.

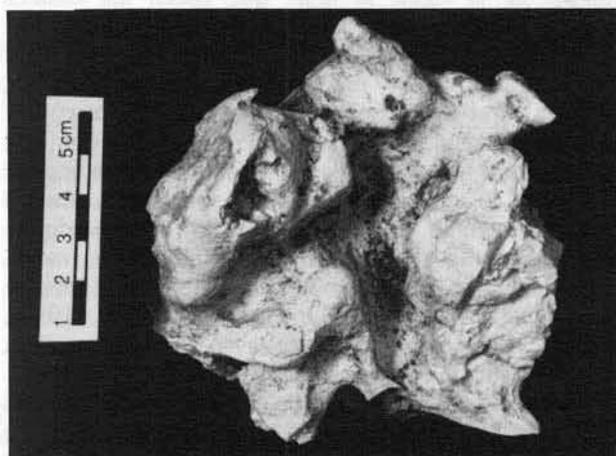


Fig. 3.—Nódulo opalino extraído de los sedimentos terrígenos. Manifiesta superficie exterior muy irregular, posiblemente como consecuencia del ambiente árido en que se constituye.

Petrología y Geoquímica

Petrográficamente los nódulos opalinos están constituidos por ópalo gelatinoide o masivo, no observándose ninguna textura que indique la existencia de un material anterior, faltando por lo tanto evidencias para deducir un proceso de reemplazamiento. Dentro de la textura general del ópalo masivo se observan microesferas (lepiesferas ?) como es usual en muchos tipos de ópalos. En las zonas de cementación, que son muy escasas, aparece ópalo fibroso (lussatita) como primer cemento.

El cuarzo se presenta en pequeña proporción en cementos bajo forma de calcedonita. No existen procesos de envejecimiento o transformación de ópalo a cuarzo, a excepción de algún punto muy localizado donde se observa el comienzo de estos procesos muy minoritariamente a partir de lussatita.

Mediante difracción de rayos X se ha determinado que los nódulos están constituidos por ópalo C-T (sl) e indicios de cuarzo. En relación a la precisión de la estructura del ópalo C-T, debe señalarse que no se realizaron tratamientos térmicos para determinar la posibilidad de existencia de tridimita desordenada (Tada e Iijima, 1983). Por otra parte, de acuerdo con el método propuesto por Von Rad et al. (1977) se aprecia que en estos nódulos opalinos no aparece ópalo A.

Utilizando como patrón interno la reflexión 3,72 del CO_3Ba , el espaciado (101) del ópalo C-T es de 4,11 Å. Dentro de la estructura del ópalo C-T se considera que el espaciado (101) decrece cuando progresa el ordenamiento (Flörke, 1955; Jonest y Segnit, 1971, Mizutani, 1977, entre otros). De acuerdo con este último autor, un espaciado de 4,11 Å corresponde a las fases más desordenadas, y son típicas del ópalo consti-

tuido en ambiente superficial y que no ha sufrido ni enterramiento ni influencia térmica posterior.

Los análisis químicos fueron realizados por Fluorescencia de Rayos X y Absorción Atómica. Los valores medios de la composición química de las muestras estudiadas se expresan en la Tabla 1, juntamente con otros valores de ópalos continentales miocenos de la cuenca del Tajo (España) (Bustillo y Bustillo 1987, 1988). Estos últimos se escogieron para un análisis comparativo, seleccionando los ópalos más puros (más del 92% de sílice) constituidos en rocas detríticas (arcosas) o yesos, por ser los ámbitos de constitución más parecidos.

La principal característica a señalar en este análisis comparativo es la mayor pureza del ópalo de la cuenca de Olaroz, donde todos los elementos químicos mayores aparecen en menor proporción a excepción del Na_2O y en menor grado Al_2O_3 , K_2O y MgO . Estas impurezas se encuentran dentro de los márgenes normales de variación encontrados en ópalos (Mitchell y Tufts, 1973), aunque no es frecuente que la proporción de Al_2O_3 sea más baja que la CaO y Na_2O . Este hecho se ha observado, sin embargo, en algunos depósitos opalinos superficiales (ópalo A) de aguas termales (Rimdtidt y Cole, 1983).

Tabla 1.—Datos químicos de rocas opalinas continentales.

Muestra	1	2	3
SiO_2	94,48	92,16	92,70
Al_2O_3	0,05	1,34	—
Fe_2O_3 (total)	0,02	0,33	—
MnO	—	—	—
MgO	0,04	1,02	0,15
CaO	0,23	0,26	1,36
Na_2O	0,11	0,03	0,09
K_2O	0,05	0,25	—
P_2O_5	0,01	0,04	0,01
TiO_2	—	0,05	0,40
Pi	4,49	4,42	5,31
Rb	37	43	33
Ba	<5	42	102
Sr	14	21	1097
La	16	<5	<5
Y	<5	<5	<5
Th	26	23	24
Zn	<5	<5	<5
Cu	<5	11	11
Ni	<5	<5	<5
Nb	28	26	22
Zr	84	96	23

Pi. Pérdida por ignición a 900°C.

1. Valores medios de los nódulos opalinos del salar de Olaroz, Argentina.

2. Valores medios de silcretas sobre arcosas. Parla, España.

3. Valores medios de nódulos opalinos en yesos. Brea de Tajo, España.

Composición en óxidos (% en peso); los elementos son expresados en p.p.m.

También podría pensarse que el CaO y el Na₂O son aportados por algún mineral distinto a la sílice y que existe en cantidades inferiores al límite de detección de DRX. Un mineral probable sería la ulexita, ya que por una parte contiene los óxidos referidos (B₅O₉NaCa 8H₂O) y por otra ha sido frecuentemente encontrado como nódulos en los salares y sus playas (Alonso y Gutiérrez, 1984).

Los elementos traza más importantes por su cantidad son el Zr y el Rb. En general, todos los elementos traza analizados aparecen en cantidades inferiores a la de los ópalos de la cuenca del Tajo a excepción del La y menos ostensiblemente el Th y el Nb.

Discusión genética

El análisis de los sedimentos de las cuencas endorreicas continentales de la Puna muestra un modelo general en el que se pasa de facies clásticas en los bordes morfológicamente activos, a facies carbonáticas de origen travertínico termal (normalmente restringidas) y por último a facies evaporíticas centrales. Estas últimas están constituidas por yeso, luego boratos y final halita en las zonas centrales de máxima profundidad. Es sabido que ciertas rocas silíceas pueden ocupar una posición proximal o marginal en ciertos salares, estando su génesis ligada a la sedimentación evaporítica. Sin embargo, el caso que nos ocupa, por su carácter puntual, por el hecho de haber sido reconocido únicamente en la cuenca de Olaroz, y por el tipo de rocas en que los nódulos silíceos se incluyen, no parecen corresponder a las facies silíceas mencionadas. Los nódulos opalinos estudiados no aparecen ligados a las facies evaporíticas, sino a los abanicos aluviales, zonas donde se localizan ciertos depósitos de aguas termales en cuencas evaporíticas cerradas efímeras (Hardie, Smoot y Eugster, 1978).

Los nódulos opalinos del salar de Olaroz no presentan texturas ni relictos mineralógicos que indiquen la existencia de un material previo. Es difícil determinar por lo tanto, si estos nódulos se han formado por reemplazamiento o ha habido durante su crecimiento un desplazamiento progresivo de los terrígenos que componen el sedimento detrítico en que aparecen incluidos.

La composición química del ópalo, donde el Na y Ca superan al Al, hace pensar en la posibilidad de que estos nódulos provengan del reemplazamiento de nódulos de ulexita, llamados normalmente bolas de algodón, y que son una de las facies evaporíticas más frecuentes en los salares del Altiplano. Sin embargo conviene señalar que no se ha encontrado ningún indicio de ulexita en los afloramientos portadores de los nódulos silíceos. Por otra parte, si los nódulos se produjesen por silicificación de ulexita, habría que considerar la influencia de los boratos, como factor

fijante de la sílice, al igual que hacen los sulfatos (Arbey, 1980).

Una vez constituidos los nódulos opalinos por reemplazamiento o precipitación directa de sílice, debido a que son recientes (Pleistoceno-Holoceno) y a que se encuentran en un clima muy árido con alta evaporación y falta de agua, no sufren prácticamente procesos de disolución, ni transformación a cuarzo (envejecimiento). La aparición sólo de calcedonita como cemento de escasas y pequeñas grietas, indica que cuando se produce esta cementación el ambiente no es ni sulfatado, ni rico en Mg (Kastner, 1980), características bastante frecuentes en silcretas de clima árido (Watts, 1980; Summerfield, 1983).

La formación de rocas opalinas en zonas próximas a la superficie (silcretas), por enriquecimiento en sílice del techo de los mantos freáticos como efecto de la evaporación en climas áridos, en un hecho conocido (Summerfield, 1983). Sin embargo, las silcretas así constituidas tienen mayor extensión y un carácter más general que el observado en la cuenca de Olaroz, donde su aparición está muy localizada. En nuestro caso pensamos que la causa principal del enriquecimiento en sílice es la contaminación local y en un momento dado de las aguas freáticas de los sedimentos de pie de monte por aguas termales. La existencia de aguas termales se hace patente en superficie por los diferentes depósitos travertínicos, entre los que hay que destacar los que constituyen importantes yacimientos de boratos (Alonso, 1986). La mezcla de aguas freáticas y termales originaría freáticos más concentrados en sílice si se tiene en cuenta que la concentración normal de sílice en aguas freáticas es de 5-60 ppm, mientras que en aguas termales es de 100-600 ppm, según datos recopilados por Anderson (1972). El grado de supersaturación alcanzado por la mezcla depende en general de la composición inicial de ambas aguas, de su temperatura y de la proporción en que entran cada una en la mezcla (Arnorsson 1975). La falta de titanio en la composición química, podría indicar que las aguas termales eran alcalinas o neutras, ya que según Ichikuni y Kobayashi (1970) los sinter silíceos derivados de aguas termales ácidas muestran contenidos altos en TiO₂. En nuestro caso teniendo en cuenta que estos nódulos se formaron cerca de la superficie debe pensarse también en la influencia de la evaporación.

Conclusiones

- 1) Los nódulos silíceos de la cuenca de Olaroz no presentan las características de las silcretas ni son rocas silíceas ligadas a la sedimentación salina de las cuencas evaporíticas.
- 2) La génesis de estos nódulos debe estar relacionada con la contaminación de los mantos freáticos

por aguas termales locales de carácter alcalino o neutro. Los sedimentos de los abanicos aluviales por su mayor porosidad, serían más apropiados para el almacenamiento de estas aguas, y es allí donde se localiza la precipitación de sílice.

3) En los nódulos estudiados la composición mineralógica de opalo C-T y su grado de desorden son típicos de rocas silíceas formadas en superficie; sin embargo, no existen pruebas sobre el mecanismo de emplazamiento (reemplazamiento o desplazamiento de un material previo).

4) La composición química de los nódulos revela ciertas anomalías si se compara con la de otras rocas silíceas continentales formadas en ambientes endorreicos en relación con evaporitas o rocas detríticas. Esto puede ser explicado bien por la influencia de las aguas termales o bien por la presencia de ulexita, que aunque no se ha encontrado en la roca caja de los nódulos, si es frecuente en otros tipos de facies de la cuenca de Olaraz.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a J. Arroyo, J. L. Casaseca, M. Castillejo, C. Sendra, A. Viloria, por su asistencia técnica. R. García, M. I. Ruiz y M. A. Vallejo, realizaron los análisis químicos. Este trabajo propiciado por el acuerdo marco entre el CSIC (España) y CONYCEP (Salta, Argentina), fue financiado a través de los proyectos Pr 84/65 CAICYT e ID 200 CSIC.

Referencias

- Alonso, R. y Gutiérrez, R. (1984). Zonación de ulexita en los salares de la Puna Argentina. *Rev. Asoc. Geol. Argentina*, 39, 52-57.
- Alonso, R.; Viramonte, J. y Gutiérrez, R. (1984). Puna Austral. Bases para el subprovincialismo geológico de la Puna Argentina, *IX Congr. Geol. Argentino (Bariloche)*; Actas, I, 43-63.
- Alonso, R. (1986). *Ocurrencia, posición estratigráfica y génesis de los depósitos de boratos de La Puna Argentina*, Tesis Doctoral. Universidad de Salta (Inédita).
- Arbey, F. (1980). Les formes de la silice et l'identification des évaporites dans les formations silicifiées. En: *Les évaporites, mécanismes, diagenèse et applications. Bull. Cent. Rech. Explor. Prod. Elf. Aquitaine*, 4, 309-364.
- Arnorsson, S. (1975). Application of the silica geothermometer in low temperature hydrothermal areas in Iceland. *Amer. J. Sci.*, 275, 763-784.
- Anderson, G. M. (1972). Silica geochemistry. En: *The encyclopedia of geochemistry and environmental sciences*. 1085-1087.
- Bustillo, M. A. y Bustillo, M. (1987). Contribución al conocimiento petrológico y geoquímico de silcretas formadas por silicificación (Mioceno, Cuenca del Tajo). *Bol. Geol. Min.*, 98, 238-255.
- Bustillo, M. A. y Bustillo, M. (1988). Características diferenciales e interpretación genética de ópalos constituidos en sedimentos biosilíceos y ópalos inorgánicos. *Bol. Geol. Min.*, 99, 615-627.
- Florke, O. W. (1955). Zur frage des «Hóch» cristobalitic in Opalen, bentoniten und glasern. *N. Jb. Miner. Mh.*, 217-233.
- Hardie, L. A.; Smoot, J. P.; Eugster, H. P.: (1978). Saline lakes and their deposits: A sedimentological approach: *Int. Ass. Sedimentol. Spec. Pub.*, 2, 7-41.
- Ichikuni, M.; Kobayashi, S. (1970). Titanium and aluminium in siliceous sinters. *Chem. Geol.*, 5, 131-137.
- Jones, J. B.; Segnit, E. R. (1971). The nature of opal. I. Nomenclature and constituent phases. *Geol. Soc. Australia*, 18, 57-68.
- Kastner, M. (1980). Length-slow chalcedony; the end of the new testament. *Trans. Amer. Geophys. Union*, 61, 399.
- Mitchell, R. S.; Tufts, S. (1973). Wood Opal. A tridymite like Mineral. *Amer. Mineral.* 58, 717-720.
- Mizutani, S. (1977). Progressive ordering of cristobalitic silica in the early stage of diagenesis. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 61, 129-140.
- Rimstidt, J. D.; Cole, D. R. (1983). Geothermal mineralization I: the mechanism of formation of the Beowawe, Nevada, siliceous sinter deposit. *Amer. J. Sci.*, 283, 861-876.
- Summerfield, M. A. (1983). Silcrete a palaeoclimatic indicator: Evidence from southern Africa. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 41, 65-81.
- Summerfield, M. A. (1983). Silcrete. En *Chemical sediments and geomorphology*. Academic. Press., 59-93.
- Tada, R.; Ijima, A. (1983). Identification of mixtures of opaline silica phases and its implication for silica diagenesis. *Developments in Sedimentology*, 36, 229-247.
- Watts, N. L. (1980). Quaternary pedogenic calcretes from the Kalahari (Southern Africa): mineralogy, genesis and diagenesis. *Sedimentology*, 27, 661-686.
- Von Rand, U.; Riech, V.; Rosch, H. (1977). Silica diagenesis in continental margin sediments of Northwest Africa. *Initial Reports of D.S.D.P.* 41, 879-905.

Recibido el 24 de octubre de 1988

Aceptado el 6 de abril de 1989