

Los depósitos silíceos del campo geotérmico de El Tatio, Chile

The silica sinter deposits of the geothermal field of El Tatio, Chile

J.L. Fernández Turiel¹, M. García Vallès², D. Gimeno Torrente³,
J. Saavedra Alonso⁴ y S. Martínez Manent²

1 Institut de Ciències de la Terra J. Almera, CSIC, Solé i Sabaris s/n, 08028 Barcelona, jlfernandez@ija.csic.es

2 Dpt. Cristal·lografia, Mineralogia i Dipòsits Minerals, Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona, Martí i Franquès s/n, 08028 Barcelona

3 Dpt. Geoquímica, Petrologia i Prospecció Geològica, Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona, Martí i Franquès s/n, 08028 Barcelona

4 IRNASA, CSIC, Cordel de Merinas 40-52, 37008 Salamanca

Resumen: Los depósitos de sínter silíceos del campo geotérmico del El Tatio en los Andes del norte de Chile están constituidos básicamente por ópalo-A, aunque también hay en baja proporción ópalo-A/-CT y ópalo-CT. Otras fases minoritarias son halita, silvita, realgar, teruggita, sassolita y cuarzo. El ópalo-A se deposita en los géiseres y en las fuentes termales a partir de aguas neutras ricas en cloruro sódico y saturadas en sílice. La rapidez del enfriamiento del agua y la evaporación controlan su precipitación. Asociadas a este ambiente hay numerosos organismos (cianobacterias, bacterias verdes y diatomeas) adaptados a las altas temperaturas del agua. El parámetro ecológico más importante relacionado con la precipitación de la sílice es el gradiente de temperatura, que varía desde 86 °C (punto de ebullición del agua a los 4.300 m de altitud de El Tatio) hasta 20 °C. Por debajo de esta temperatura el ópalo-A deja de precipitar. Las morfologías de ópalo-A observadas son esferas de sílice formando agregados botroidales, masas densas, sílice porosa y sílice biogénica (diatomeas), mientras que el ópalo-CT está en forma de plaquetas y lepisferas. Diagenéticamente, la transformación de ópalo-A a ópalo-A/-CT o bien a ópalo-CT es muy baja, lo que es debido a que no ha habido el tiempo suficiente para que se haya podido producir y/o a que las condiciones térmicas no han sido las adecuadas.

Palabras clave: *sínter, ópalo, geysers, fuente termal, El Tatio (Chile).*

Abstract: *The silica sinter deposits of the geothermal field of El Tatio in the Andes of Northern Chile consists mainly of opal-A, although there are also low contents of opal-A/-CT and opal-CT. Other minor phases are halite, silvite, realgar, teruggite, sassolite and quartz. The opal-A is deposited in the geysers and hot springs from neutral, silica saturated, sodium chloride water. Water cooling rate and evaporation are the main factors controlling this deposition. There are numerous organisms (cyanobacteria, green bacteria, and diatoms) living in this environment. The most important ecological parameter related to the silica precipitation is the temperature gradient, which ranges from 86 °C (boiling temperature at the 4,300 m a.s.l. of El Tatio) to 20 °C. At lower temperature the silica does not precipitate. The observed opal-morphologies are silica spheres grouped on botryoidal aggregates, dense masses, porous silica and biogenic silica (diatoms), whereas the opal-CT occurs as platelets and lepispheres. The diagenetic transformation degree of opal-A to opal-A/-CT and opal-CT is low because of the short age of these deposits and/or the thermal conditions have not been adequate.*

Key words: *sinter, opal, geysers, hot spring, El Tatio (Chile).*

INTRODUCCIÓN

La formación de depósitos silíceos en ambiente sedimentario es bastante excepcional. Este fenómeno se puede atribuir a que las concentraciones de silicio en las aguas continentales y marinas no permiten que durante los procesos evaporíticos se lleguen a alcanzar, más que muy excepcionalmente, los niveles necesarios en este elemento. Del mismo modo, es poco frecuente la precipitación directa de sílice en los lagos alcalinos. En este tipo de ambiente se suelen producir sus precursores sódicos del tipo de la magadiita. Por este motivo, los depósitos silíceos primarios normalmente aparecen asociados a actividad hidrotermal (ya sea submarina o

subaérea) y/o a la actividad catalizadora de organismos (diatomeas, radiolarios, esponjas silíceas, bacterias, etc.) que emplean este elemento en la síntesis de sus tecas, frústulas o agujas opalinas. Otros aspectos, como la no dilución de este sedimento de precipitación química o bioquímica con aportes terrígenos (o alternativamente la concentración mecánica de sus componentes esqueléticos) permiten o favorecen la formación de estas rocas silíceas. La naturaleza opalina de los precipitados primarios (ya sean inorgánicos o bioinducidos) hace que estas rocas estén sometidas a un rápido proceso de evolución diagenética.

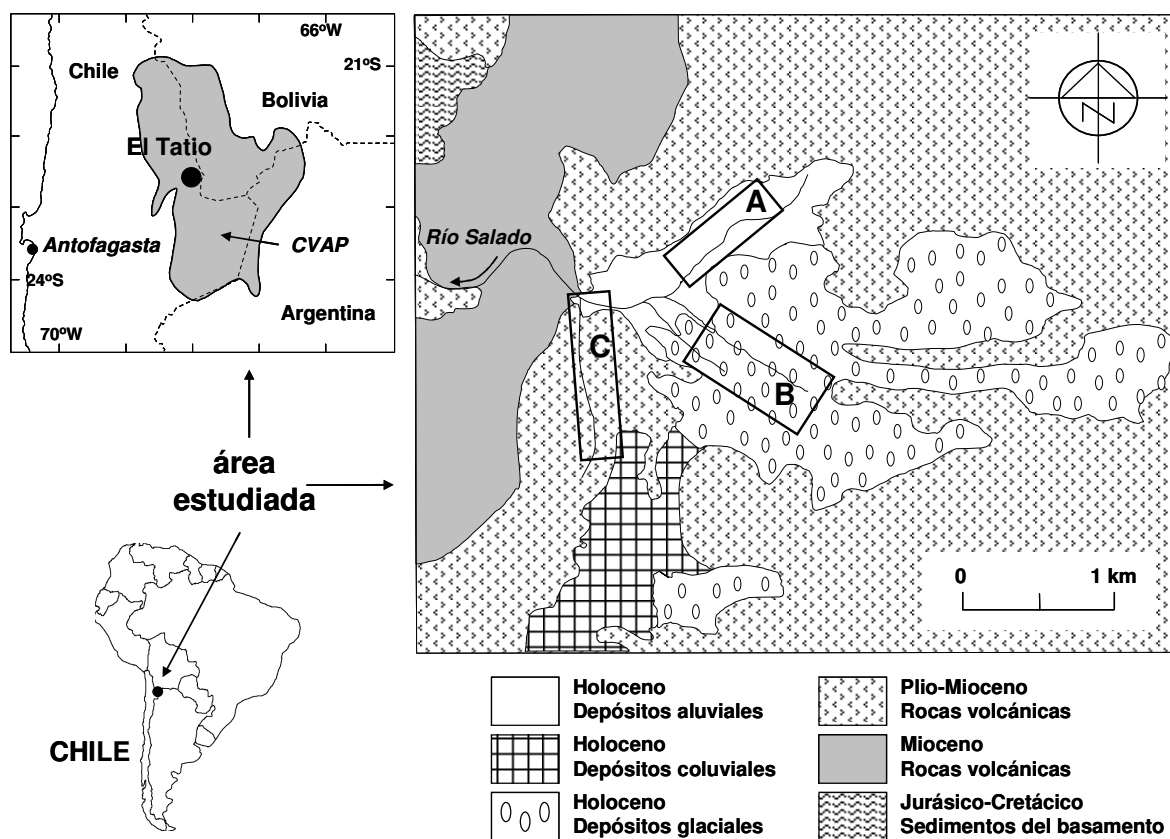


FIGURA 1. Situación geográfica y geológica del campo geotérmico de El Tatio en los andes del norte de Chile (CVAP, Complejo Volcánico del Altiplano-Puna). Los rectángulos A, B C indican las áreas con los principales depósitos de sínter silíceos. Basada en Fernández-Turiel et al., 2005).

El objetivo de este trabajo es la caracterización petrológica y mineralógica de los depósitos de sínter silíceos producidos en ambiente subaéreo en la región de “El Tatio” (norte de Chile), que constituye el mayor campo de geysers del hemisferio sur, ocupando el tercer lugar a nivel mundial. Igualmente se pretende estudiar los procesos diagenéticos iniciales que afectan a la transformación de un precipitado opalino hidrotermal, y la influencia que han tenido los organismos en la tasa y manera de acumulación del sedimento silíceo

ÁREA DE ESTUDIO

El campo geotérmico de El Tatio se encuentra en el norte de Chile (Region II) cerca del desierto de Atacama. Ocupa un área de géiseres, fumarolas y pequeñas lagunas termales de $\sim 30 \text{ km}^2$, los cuales generan en la actualidad depósitos silíceos. Se emplaza en la Cordillera andina en un graben de $\sim 4 \text{ km}$ de ancho (WNW-ESE) y 6 km de largo (NNE-SSW), rodeado de picos volcánicos recientes a unos 4.300 metros de altitud (Fig. 1); a esa altura el agua entra en ebullición a los $86 \text{ }^\circ\text{C}$. En función de los cambios estacionales se estima que la descarga termal hídrica es de entre 250 y 500 l seg^{-1} (Lahsen y Trujillo, 1976). En base a los datos geoquímicos y estructurales, se puede afirmar que el agua proviene de las precipitaciones en una zona situada

a $12\text{-}20 \text{ km}$ al E-SE de El Tatio (Giggenbach, 1978; Cortecci *et al.*, 2005). A nivel regional, la migración lateral de fluidos está controlada por la permeabilidad de las rocas volcánicas, mientras que su ascensión está limitada por las fracturas NW-SE y SE-SW y, sobre todo, por la barrera natural del horst de la Serranía de Tucle - Loma Lucero. Las aguas concentradas en la zona del Tatio fluyen superficialmente hasta verter sus aguas en el río Salado.

MATERIAL Y MÉTODOS

Las muestras estudiadas corresponden a tres ambientes deposicionales representativos dentro de este campo geotérmico: cono y montículo de salpicadura del geiser, pequeñas lagunas de aguas termales y zonas de descarga (manto, terraza, canal) (Fig. 2).

El estudio petrográfico, macro y microscópico, se realizó a partir de láminas delgadas y secciones pulidas. En el análisis con el microscopio electrónico de barrido con microanalizador EDX con detector de energía dispersiva de espectroscopia de rayos-X, se utilizó fractura fresca, y se metalizó la superficie de la muestra con grafito. La caracterización de las fases minerales se determinó por difracción de rayos-X.



FIGURA 2. Vista general del campo geotérmico de El Tatio.

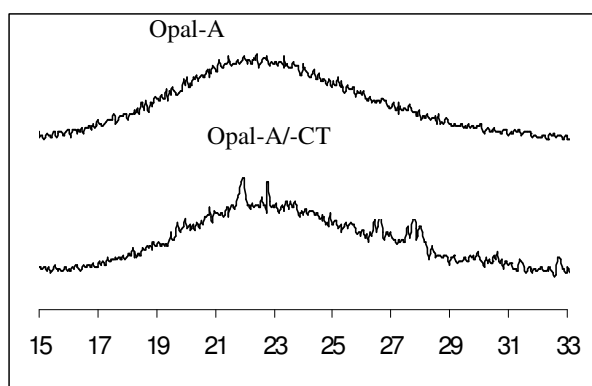


FIGURA 3. Difractogramas comparando ópalo-A y ópalo-A/-CT; escala de grados 2 theta en abscisas e intensidades relativas en ordenadas.



FIGURA 4. Microterrazas distales en donde el ópalo-A aparece acompañado por halita, sassolita, ópalo-CT, silvita y teruggita.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Desde un punto de vista mineralógico la fase dominante es el ópalo-A ($\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) (Fig. 3). En menor proporción se ha determinado la presencia de ópalo-A/-CT (Fig. 3) y solo en dos muestras se ha observado ópalo-CT. Otras fases minerales minoritarias presentes que acompañan a las de ópalo son la halita (NaCl), la

silvita (KCl) y el rejalgar (AsS). Finalmente, en las muestras emplazadas en las áreas más distales de este sistema termal (Fig. 4), se observa en forma de trazas la presencia de teruggita ($\text{Ca}_4\text{MgAs}_2\text{B}_{12}\text{O}_{22}(\text{OH})_{12} \cdot 12(\text{H}_2\text{O})$), sassolita (H_3BO_3) y cuarzo (SiO_2).

Las observaciones realizadas en el microscopio electrónico ponen de manifiesto cuatro morfologías principales de ópalo-A: (1) esferas de sílice ($<10 \mu\text{m}$ de diámetro) (Fig. 5), a veces dispuestas en forma de agregados y superficies botroidales (Fig. 6), (2) masas densas de sílice (Fig. 6), (3) sílice porosa (Fig. 6), y (4) sílice biogénica (por ejemplo, restos de diatomeas, Fig. 6). Ópalo-CT se observa en forma de lepiesferas y plaquetas ($<5 \mu\text{m}$), a veces agregadas.

En general, el ópalo-A se deposita alrededor de los géiseres y en las fuentes termales neutras ricas en cloruro sódico y saturadas en sílice. En ellas la concentración en Cl, Na, Ca, S y B es menor al 5% en peso (Fernandez-Turiel *et al.* 2004).

Los principales procesos que controlan la precipitación del ópalo-A son la rapidez del enfriamiento del agua y la evaporación debida al ambiente seco propio de esta zona andina. Es de resaltar el abundante número de comunidades microbianas adaptadas a las altas temperaturas del agua, como es el caso de las cianobacterias (Fig. 5).

El conjunto de organismos corresponden a cianobacterias, bacterias verdes y diatomeas. El parámetro ecológico más importante directamente relacionado con la precipitación de la sílice es el gradiente de temperatura, en este caso el punto de partida se produce a 86°C (punto de ebullición del agua en El Tatio) a partir de 20°C el ópalo-A deja de precipitar (Fernandez-Turiel *et al.*, 2005).

Este estudio ha permitido establecer correlaciones entre temperaturas de formación y las estructuras macro- y microscópicas del sinter:

- $70\text{-}75^\circ\text{C}$ se produce la precipitación de un laminado grueso de sinter; los organismos asociados en este caso no son fotosintéticos, como es el caso de las bacterias hipertermófilas.

- 60 a $70\text{-}75^\circ\text{C}$ se origina un laminado constituido por espículas y columnas con pequeñas cúpulas, que corresponden a las zonas de salpicadura; en este caso los organismos dominantes son similares a las cianobacterias: *Synechococcus*.

- 40 y 60°C la textura pasa a ser laminada, con espículas y columnas, y cuerpos subsféricos oncoides, que corresponde a las zonas de fuentes termales. Desde el punto de vista orgánico está constituido por cianobacterias filamentosas (*Phormidium*) y diatomeas (por ejemplo, *Synedra*).

- 20 y 40°C laminado de espículas y oncoides con morfologías variables, constituidas por tapices de

cianobacterias de tipo *Phormidium* y *Calothrix* y las diatomeas (por ejemplo, *Synedra* sp.) que son muy abundantes. Este ambiente se encuentra en las zonas más distales.

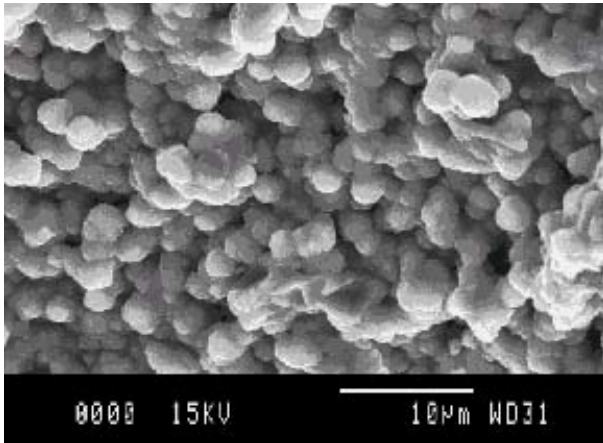


FIGURA 5. Imagen al microscopio electrónico de un conjunto de esferas silíceas correspondiente al ópalo-A.

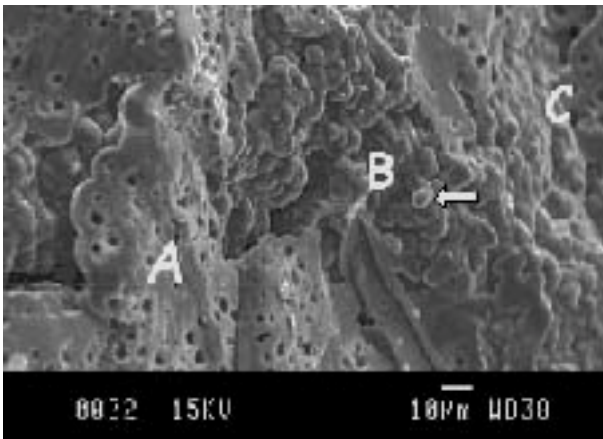


FIGURA 6. Imagen al microscopio electrónico de distintas morfologías de ópalo-A: (A) capa formada por una masa densa de sílice; (B) cuerpos microesféricos de ópalo-A (flecha); (C) superficie botrioidal de ópalo-A.

El ópalo-A/CT se localiza en las aguas termales y zonas de descarga donde la temperatura del agua es mayor, mientras que ópalo-CT sólo se ha determinado en fragmentos de sinter re trabajados.

A partir del estudio del grado de cristalinidad del ópalo, determinado utilizando los espectros de difracción de rayos-X, se ha concretado su grado de madurez. Se ha establecido calculando los valores de la anchura a media altura (FWHM) de la banda correspondiente al ópalo y utilizando la ecuación de Scherrer.

El rango de valores calculados de FWHM para el ópalo-A ha oscilado entre $7,5$ y $8,3\Delta^2$; son valores altos respecto a los sinter, indicando que se trata de un ópalo inmaduro. En general, estos valores son ligeramente más altos en la zona del cono del geiser, en donde coexisten la fase vapor y la líquida del agua, mientras que en las zonas de fuentes termales domina sólo la última. Estos valores de FWHM concuerdan con

el tamaño de cristalinidad calculado a partir de la ecuación de Scherrer: $1,6$ a $2,9$ nm para el ópalo-A y el ópalo-A/CT respectivamente.

Desde un punto de vista diagenético, la transformación de ópalo-A a ópalo-A/CT o bien a ópalo-CT es muy baja, no ha habido el tiempo suficiente para que se haya podido producir o bien las condiciones térmicas no han sido las adecuadas. En general, la maduración de ópalo-A a ópalo-A/CT se ha determinado en la zona cercana a una fumarola. El ópalo-CT se ha localizado solo en dos muestras correspondientes a ambientes deposicionales distales.

La halita y la silvita se encuentran en depósitos correspondientes a la salida de las aguas termales o en la superficie cerca de ella, y tienen directa relación con la evaporación final de las aguas salinas procedentes de géiseres y fuentes termales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a J. Illa por la colaboración en la preparación de las muestras y al soporte técnico de los miembros de los Servicios Científico Técnicos de la Universidad de Barcelona. Este trabajo ha sido efectuado en el marco de los Grupos Consolidados de Investigación SGR-2005-795 PEGEFA y SGR-2005-00589, AGAUR-DURSI, Generalitat de Catalunya, y ha recibido financiación de los proyectos ACI2002-10 (DURSI de la Generalitat de Catalunya).

REFERENCIAS

- Cortecci, G., Boschetti, T., Mussi, M., Lameli, C.H., Mucchino, C. y Barbieri, M. (2005): New chemical and original isotopic data on waters from El Tatio geothermal field, northern Chile. *Geochemical Journal*, 39(6), 547-571.
- Fernandez-Turiel, J.L., Garcia-Valles, M., Gimeno-Torrente, D., Saavedra-Alonso, J. y Martinez-Manent, S. (2005): The hot spring and geyser sinters of El Tatio, Northern Chile. *Sedimentary Geology*, 180, 125-147.
- Fernandez-Turiel, J.L.; Gimeno, D. y Garcia-Valles, M. (2004): Geochemical modelling of El Tatio geothermal system (northern Chile) implications for the genesis of borates, arsenic sulphides and halides. En: *IAVCEI General Assembly 2004 Pucón (Chile)*
- Giggenbach, W.F. (1978): The isotope composition of waters from the El Tatio geothermal field, northern Chile. *Geochimica Cosmochim Acta*, 42, 979-988.
- Lahsen, A. y Trujillo, P. (1976): The geothermal field of El Tatio, Chile. Proceedings, Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco, May 1975, Volume 1: Washington, D.C., U.S. Government Printing Office (Lawrence Berkeley Laboratory, University of California), pp. 170-177.