

IV Reunión de Geomorfología
Grandal d'Anglade, A. y Pagés Valcarlos, J., Eds.
1996, Sociedad Española de Geomorfología
O Castro (A Coruña)

LIMNOGEOLOGÍA DE LAGUNA CHUNGARÁ Y CAMBIO CLIMÁTICO DURANTE EL HOLOCENO SUPERIOR EN EL ALTIPLANO CHILENO SEPTENTRIONAL.

Valero Garcés, B.L.¹, Grosjean, M.², Schwalb, A.³, Kelts, K.³,
Schreier, H.⁴ y Messerli, B.²

¹ Instituto Pirenaico de Ecología-Estación Experimental de Aula Dei, CSIC,
Apdo 202, Zaragoza 50080, España

² Department of Physical Geography, University of Bern, Hallerstrasse 12,
CH-3012 Berna, Suiza

³ Limnological Research Center, 220 Pillsbury Hall, University of Minnesota,
Minneapolis, MN 55455, EE UU

⁴ Resource Management Science, University of British Columbia, Vancouver BC
V6T 1Z3, Canada

RESUMEN

El estudio sísmico de la Laguna Chungará (69° 30' O, 18° 15'S, 4520 m. s.n.m, Altiplano chileno septentrional) y el análisis sedimentológico de varios sondeos ha permitido reconstruir la evolución de la sedimentación lacustre en el lago durante el Holoceno Superior. Se han identificado dos asociaciones de facies: i) litoral, más somera, compuesta por facies de turbera y ii) plataforma lacustre, más profunda, compuesta por facies con abundantes fragmentos de Characeae. Estas facies alternan en tres ciclos sedimentarios provocados por fluctuaciones en el nivel del lago. Estas variaciones hidrológicas en la laguna han sido causadas por cambios en el balance hídrico que a su vez reflejan importantes fluctuaciones climáticas durante el Holoceno Superior.

Palabras clave: Limnogeología, Paleoclimatología, Holoceno, Altiplano chileno

ABSTRACT

We reconstruct the Late Holocene sedimentary history of Laguna Chungará (69° 30' W, 18° 10'S, 4520 m.a.s.l., northern Chilean Altiplano) based on high resolution seismic profiling and sedimentologic analyses of cores. Two sedimentary facies associations have been defined and interpreted: i) macrophyte-dominant littoral, composed of black muds with macrophyte remains and peaty muds, and ii) Characeae-dominant lacustrine self, composed of gray muds and sands with abundant Characeae remains. The two facies associations define three cycles caused by oscillations in the lake level from shallower (macrophyte) to deeper (Characeae) conditions. Changes in the hydrology of Laguna Chungará reflect variations in the effective moisture (precipitation - evaporation) in the

Altiplano during the Late Holocene.

Key words: Limnogeology, Paleoclimatology, Holocene, Chilean Altiplano.

INTRODUCCIÓN

Para desarrollar estrategias que minimicen los posibles impactos negativos en los ecosistemas de futuros cambios climáticos y ambientales necesitamos un conocimiento detallado de los cambios globales en el pasado. Entre los archivos terrestres de información paleoambiental, los sistemas lacustres son especialmente óptimos por su rápida respuesta a cambios externos, continuidad y alta resolución del registro. Sin embargo, para obtener la máxima información paleoambiental de las secuencias sedimentarias lacustres es preciso construir modelos sedimentológicos que integren el máximo número de variables con significación ambiental (nivel de agua en el lago, cambios de salinidad, biota, etc., VALERO GARCÉS & KELTS, 1995). En este artículo investigamos el relleno sedimentario de Laguna Chungará, un lago andino situado a 4520 m de altitud en la zona intertropical del Altiplano chileno y proponemos un modelo de sedimentación para el Holoceno tardío principalmente controlado por cambios climáticos.

ÁREA DE ESTUDIO

Laguna Chungará (69° 30' O, 18° 15' S) es el lago a mayor altitud del Altiplano (4520 m) y el segundo en extensión y profundidad (21.5 km², 40 m) después del Lago Titicaca. Se localiza en la cuenca del río Lauca, la más elevada y occidental cuenca continental del Altiplano (BÖRGEL, 1983; BAIED, 1991; Fig. 1), rellena de unos 120 m de sedimentos fluviales, lacustres y volcánicos de edad Mioceno Superior - Plioceno (KÖTT *et al.*, 1995). El Altiplano es una meseta elevada de unos 100.000 km² que se extiende desde los 15° a los 28° S a una altitud media de 3.800 m. Fue configurado como unidad morfoestructural en la fase tectónica Quechua (Mioceno) y ha experimentado importante actividad tectónica y volcánica hasta la actualidad, responsable de la génesis de numerosas cuencas continentales. Con anterioridad al Pleistoceno Superior, es probable que existiera un lago de gran extensión en el NE de la cuenca del Lauca que fue dividido en dos subcuencas (Cotacotani y Chungará) tras el colapso del Nevado de Parinacota entre 17000 BP - 15000 BP (BAIED, 1991; BAIED & WHEELER, 1993). La presencia de numerosas morrenas y depósitos fluvioglaciares indica que los glaciares descendieron hasta los 4000 m durante las glaciaciones pleistocenas antes del colapso del volcán.

Las aguas de laguna Chungará son diluidas (TDS = 1.2 g/l), alcalinas (pH=9) y de composición CO₃-SO₄-Na-Mg (MLADINIC *et al.*, 1987). El lago es polimíctico y oligotrófico y contiene numerosas especies endémicas de peces (Orestias). Las zonas litorales están colonizadas por comunidades de macrofitas.

En la región del lago Chungará, el clima es árido y frío, con evaporación potencial que excede grandemente los 440 mm/año de precipitación durante el verano austral (Invierno Boliviano; BAIED, 1991). Climas

semiáridos se establecieron en el Altiplano desde el Mioceno Medio como consecuencia de la latitud, la elevación de los Andes y la presencia de corrientes oceánicas frías. Sin embargo, las fluctuaciones climáticas durante el Cuaternario, incluyendo varias glaciaciones, han sido considerables (MESSERLI *et al.*, 1993; GROSJEAN *et al.*, 1996; VALERO-GARCÉS *et al.*, 1996).

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó un estudio sísmico del lago con un sistema de alta resolución y frecuencia variable (1-12 KHz) ORE-Geopulse con un registrador digital gráfico EPC 9800. Un sondeo corto (50 cm) se tomó en la subcuenca NO a una profundidad de agua de unos 20 m. En la plataforma lacustre de la subcuenca oriental se tomó un sondeo largo (3.69 m) a una profundidad de agua de unos 5 m con un sistema Livingstone de pistón fijo. Este sondeo fue dividido longitudinalmente por la mitad, fotografiado y las facies sedimentarias se describieron de acuerdo con su litología, color, tamaño de grano, restos vegetales y animales y estructuras sedimentarias. Los valores de susceptibilidad magnética fueron inferiores al límite de detección. El sondeo fue muestreado cada 5 cm para análisis microscópicos, mineralógicos y químicos. El carbono total se determinó con un Leco Carbon Analyser y el carbono orgánico mediante titración. La composición mineral se determinó con un difractómetro Phillips PW 1050-65.

RESULTADOS

ESTRATIGRAFÍA SÍSMICA

El estudio sísmico permitió conocer la estructura de la cuenca (morfología, batimetría) y del relleno sedimentario. Laguna Chungará está compuesta por dos subcuencas (Fig. 2): i) la oriental es de menor tamaño y se compone de una amplia plataforma lacustre entre 3 - 5 m de profundidad, un talud abrupto y una llanura abisal a unos 10 m de profundidad (Perfil 1); ii) la central, alargada según una dirección NO-SE tiene bordes escalonados con una plataforma lacustre a unos 10 m de profundidad, un talud abrupto y una nueva plataforma inclinada que conecta con la llanura abisal a 40 m de profundidad (perfiles 2, 3, 4 y 5). La actividad sísmica durante el Cuaternario queda en evidencia por las numerosas fallas que interrumpen la serie lacustre. En la subcuenca oriental el relleno lacustre es de unos 5 metros y pueden diferenciarse dos unidades sísmicas: la superior entre el fondo del lago (reflector Bt) y el reflector C1 se caracteriza por reflectores menos marcados y menos numerosos que la inferior. El sustrato volcánico es acústicamente masivo por debajo de C2. Las mismas unidades sísmicas se distinguen en la subcuenca central, donde el relleno supera los 10 m. Tanto en el extremo oriental (perfil 2) como en el occidental (perfil 3) puede reconocerse una plataforma litoral sumergida que interpretamos se originó cuando el lago era unos 10 m menos profundo. En la bahía noroccidental puede distinguirse otra unidad entre C2 y el sustrato volcánico, de carácter más masivo, que podría ser de origen fluvio-lacustre (perfil 4).

FACIES SEDIMENTARIAS Y MODELO SEDIMENTOLÓGICO

Los sedimentos pelágicos recuperados en el sondeo de la bahía noroccidental son barros negros laminados orgánicos (hasta 25 % de materia orgánica), con poco carbonato (6-8%). Los resultados preliminares de la datación con ^{14}C del sondeo que proviene de la plataforma litoral de la subcuenca oriental (perfil 1b) permiten considerar que esta secuencia representa la sedimentación desde el Holoceno Medio (Geyh, M., comunicación personal). El sondeo está constituido por una alternancia de dos asociaciones de facies (Fig. 3):

Asociación de facies I: Litoral lacustre de macrofitas. Esta asociación está dominada por niveles de barros orgánicos turbosos masivos muy ricos en macrorestos vegetales. Ocasionalmente aparecen: i) niveles de barros negros con restos milimétricos de macrofitas, ii) barros masivos muy finos y iii) capas milimétricas de arenas de composición siliciclástica (cuarzo, minerales máficos y fragmentos de rocas volcánicas) y bioclásticas (restos de conchas de gasterópodos y bivalvos). El contenido en carbono orgánico es elevado (10-20%) y el de carbonato (calcita) muy bajo (inferior al 5 %).

Los niveles de barros orgánicos ricos en macrorestos vegetales se interpretan como resultado de la acumulación de macrofitas en la zona litoral lacustre. Las arenas siliciclásticas fueron transportadas desde las playas a zonas más internas durante eventos tormentosos. La acción del oleaje sería responsable de las acumulaciones bioclásticas. En conjunto, la asociación de facies I se interpreta como depósito en un litoral lacustre colonizado por macrofitas. Los periodos sumergidos con escasa profundidad de lámina de agua alternarían con otros de emersión en condiciones de turbera.

Asociación de facies II: Plataforma lacustre de Characeae. En esta asociación alternan barros masivos grises y niveles arenosos, ambos compuestos principalmente por restos de Characeae. Generalmente, el contenido en otros macrorestos orgánicos no calcificados es bajo, aunque también aparecen facies con ambos tipos de restos vegetales. Debido al predominio de Characeae, el contenido en carbono orgánico de estas facies es inferior a las del litoral de macrofitas (menos 10%) y el de carbonato (calcita) supera el 5 %. Las facies de arenas y barros grises se interpretan como acumulaciones clásticas tras la disgregación de las Characeae por la acción del oleaje. La asociación de facies II representa el depósito en una plataforma lacustre cubierta por Characeae. La profundidad de la lámina de agua es difícil de estimar, pero podría llegar hasta los 10 m. Las facies con presencia de restos calcíticos de Characeae y orgánicos de otras macrofitas representan el depósito en ambientes intermedios, más próximos al litoral y con menor profundidad.

Esta alternancia de asociaciones de facies ilustra cambios en los subambientes de depósito de la subcuenca oriental desde condiciones típicamente lacustres (plataforma colonizada por Characeae) hasta condiciones más litorales tipo turbera (litoral de macrofitas). El cambio de subambientes lacustres está controlado por fluctuaciones en el nivel de las aguas del lago y, por lo tanto, son una respuesta a las variaciones hidrológicas del lago. Laguna Chungará es un sistema endorreico con un volumen de unos 385 millones de m³, cuyo aporte principal es el río Chungará que desemboca en el

extremo SE (caudal 300 - 500 l/s) y secundariamente (20% del total) los torrentes de Ajata, Mal Paso y Sopocalane (MLADINIC *et al.*, 1987). Las pérdidas de agua se producen por flujo subterráneo en dirección NO hacia los lagos Cotacotani (6 Hm³ /año) y por evaporación (1200 mm/año). En un sistema endorreico como Chungará, cambios en el balance entre precipitación y evaporación son los determinantes del volumen de agua acumulado y, por lo tanto, del nivel del lago. En áreas litorales como la subuenca oriental, fluctuaciones de unos pocos metros en el nivel del lago suponen grandes cambios en las condiciones de profundidad de agua y habitabilidad para macrofitas. Como consecuencia es en estas zonas costeras donde los cambios en el nivel de las aguas quedan mejor registrados en las facies sedimentarias.

CONCLUSIONES

Durante el periodo temporal registrado en el sondeo (Holoceno Superior), de acuerdo con nuestra interpretación sedimentológica, han ocurrido tres fluctuaciones mayores en el nivel del lago (Fig.3). Los tres episodios de facies más turbosas (asociación I) indican periodos con balance precipitación - evaporación más negativo (mayor aridez) y los tres episodios de facies más lacustres (asociación II) episodios relativamente más húmedos. La correlación con otros periodos áridos en la cercana Laguna Seca del sector Cotacotani (2000 años B.P., BAIED, 1991; BAIED & WHEELER 1993), en el Lago Titicaca más al norte (2300 y 3500 B.P., Wirrmann y Mourguiart, 1995) y el Altiplano de Atacama más al sur (GROSJEAN *et al.*, 1996; VALERO GARCÉS *et al.*, 1996) no es posible hasta que no dispongamos de una cronología detallada y fiable de estos depósitos. Sin embargo, nuestro análisis sedimentológico muestra que el Holoceno Superior en la zona subtropical del Altiplano chileno fue un periodo con fluctuaciones climáticas del orden temporal del milenio y de considerable magnitud.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte del proyecto 'Climate Change in the Arid Andes' (SNF-20-36382.92) financiado por la 'Swiss National Science Foundation' y dirigido por la Universidad de Berna, Suiza. Agradecemos a Les M. Lavkulich (Universidad de Columbia Británica, Canadá) las facilidades para trabajar en el laboratorio, a Willi Egli, Marcela Espinoza (DIFROL), Guillermo Chong (Universidad Católica del Norte, Chile) y CONAF su ayuda en la obtención de permisos de investigación y durante el trabajo de campo y a Manuel Contreras (Universidad de Chile, Santiago) su ayuda para conseguir botes, generadores y equipo de campo, así como su calurosa hospitalidad. La desinteresada ayuda de los trabajadores de la compañía de construcción de la carretera La Paz - Arica y del personal a cargo de la estación de afloramientos del Lago Chungará fue inestimable en la solución de numerosos problemas logísticos. Bea Messerli, Carlos Baied, Bettina Jenny y Klaus Kammer colaboraron en la toma de los sondeos. Los equipos sísmico y de sondeos, así como el laboratorio de análisis de sondeos fueron proporcionados por el Limnological Research Center, Universidad de Minnesota, EE UU.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAIED, C. (1991). *Late-Quaternary environments and human occupation of the South Central Andes*. Tesis Doctoral, Universidad de Montana, EE UU, 131 p. (inédita).
- BAIED C.A. & WHEELER, J.C. (1993). Evolution of High Andean Puna ecosystem environment, climate, and culture change over the last 12,000 years in the Central Andes. *Mountain Research and Development*, 13, 145-156.
- BÖRGEL OLIVARES R. (1983). *Geomorfología*. Geografía de Chile. Volumen II. Instituto Geográfico Militar de Chile, 182 p., Santiago.
- GROSJEAN, M., MESSERLI, B., AMMANN, C., GEYH, M.A., GRAF, K., JENNY, B., KAMMER, K., NÚÑEZ, L., SCHOTTERER, U., SCHREIER, H., SCHWALB, A., VALERO, B. & VUILLE, M. (1996, in press). Holocene environmental changes in the Atacama Altiplano and paleoclimatic implications. *Bulletin de l'Institut Français des Etudes Andines*.
- KÖTT, A., GAUPP, R. AND WÖRNER, G. (1995). Miocene to Recent history of the western Altiplano in northern Chile revealed by lacustrine sediments of the Lauca Basin (18°15'-18°40'S/69°30'-69°05'W). *Geol Rundsch.*, 84, 770-780.
- MESSERLI, B., GROSJEAN, M., BONANI, G., BÜRGI, A., GEYH, M., GRAF, K., RAMSEYER, K., ROMERO, H., SCHOTTERER, U., SCHREIER H. & VUILLE M., 1993. Climate change and natural resource dynamics of the Atacama Altiplano during the last 18,000 years: a preliminar synthesis. *Mountain Research and Development*, 13, 117-127.
- MLADINIC, P., HREPIC N. & QUINTANA, E.H. (1987). Caracterización física y química de las aguas de los lagos Chungará y Cotacotani. *Arch. Biol. Med. Exp.*, 20, 89-94.
- VALERO GARCÉS, B.L. & KELTS, K. (1995). A sedimentary facies model for perennial and meromictic saline lakes: Holocene Medicine Lake Basin, South Dakota, USA. *Journal of Paleolimnology*, 14: 123 - 149.
- VALERO-GARCÉS, B., GROSJEAN M., SCHWALB A., GEYH, M.A., MESSERLI, B., & KELTS, K. (1996, in press). Limnogeology of Laguna Miscanti: evidence for mid to late Holocene moisture changes in the Atacama Altiplano. *Journal of Paleolimnology*.
- WIRRMANN D. & MOURGUIART P. (1995). Late Quaternary Spatio-temporal Limnological variations in the Altiplano of Bolivia and Peru. *Quaternary Research*, 43: 2344-354.

Pies de Figuras

Figura 1. Unidades morfoestructurales en el Altiplano chileno, localización de Laguna Chungará y mapa geológico de los alrededores de Laguna Chungará y de los subambientes sedimentarios (modificado de Börgel, 1983 y Baied, 1991).

Figura 2. Perfiles sísmicos en la laguna Chungará y localización de los sondeos. La flecha en el perfil 1b marca la localización del sondeo descrito en la figura 3. Las unidades sísmicas están delimitadas por los reflectores sísmicos Bt (fondo del lago), C1, C2 y C3. Numerosas fallas (f) cortan la serie lacustre.

Figura 3. Descripción sedimentológica del sondeo de la cuenca oriental e interpretación ambiental de las dos asociaciones de facies definidas.





