

ESCENARIOS PALEOCLIMATICOS DE LOS ULTIMOS 25 000 AÑOS EN LOS ANDES BOLIVIANOS

ARGOLLO, J. & MOURGUIART Ph.

INTRODUCCION

El Altiplano es un vasto conjunto endorreico (aproximadamente 190 000 km²) situado en el corazón de los Andes del Perú, de Bolivia y de Chile. Desde un punto de vista climático, es un sistema que presenta un fuerte gradiente Noreste/Suroeste, tanto en lo que se refiere a la temperatura media como a las precipitaciones (Roche *et al.*, 1992). La distribución de las precipitaciones (y de la evaporación) explica, en particular, la existencia al Norte de un gran lago permanente, el lago Titicaca, al centro un lago semi-permanente, el lago Poopó y, al Sur grandes lagos estacionales, los salares de Coipasa y de Uyuni. Parece como si el hidrosistema en su globalidad fuera muy sensible a las variaciones interanuales del clima: en 1983, el lago Poopó se deseca mientras que en 1986, solamente 3 años más tarde, el mismo lago inunda una superficie de aproximadamente 4000 km².

Durante el Cuaternario, el clima de la Tierra sufrió una alternancia de ciclos climáticos llamados períodos glaciares/interglaciales. Los depósitos sedimentarios del Altiplano boliviano conservaron en su memoria estas oscilaciones de gran amplitud. Continuando los trabajos de Steinmann *et al.* (1904) y de Bowman (1909), Servant & Fontes (1978) propusieron un modelo de evolución de los grandes sistemas lacustres acoplados a las variaciones de extensión de los glaciares de la cordillera oriental de Bolivia (Figura 1). Esquemáticamente, el fin del Cuaternario está marcado por 3 grandes oscilaciones positivas de los balances en agua de los lagos tanto de las cuencas Norte (lago Titicaca) como de las cuencas del Sur (lagos Poopó, Coipasa y Uyuni). Si bien la más antigua, la fase "Ballivián", no está datada, las dos siguientes lo están, de < 27 000 años BP para la fase "Minchín" y de 12,5-10,5 ka BP para la fase "Tauca" (Servant & Fontes, 1978). Para estos autores, estas 3 fases lacustres mayores fueron alimentadas por el derretimiento de los glaciares y corresponden a las glaciaciones Sorata, Choqueyapu I y Choqueyapu II, de la más antigua a las más reciente (Figura 1).

Más tarde, otros autores van a cuestionar esta hipótesis (Hastenrath & Kutzbach, 1985; Kessler, 1988; Seltzer, 1992). En efecto, según ellos, el solo derretimiento de los glaciares no puede ser responsable de la creación de los inmensos lagos Minchín y Tauca (63 000 km² y 43 000 km², respectivamente, según Hastenrath & Kutzbach, 1985). Su afirmación se basa en un cálculo aproximado del volumen de

hielos, y consecuentemente de aguas, almacenado en los glaciares en el máximo de su avance. El aporte mayor en agua se debería a una fase climática húmeda que ocasionó un aumento de las precipitaciones del orden del 30%, superior a los valores actuales.

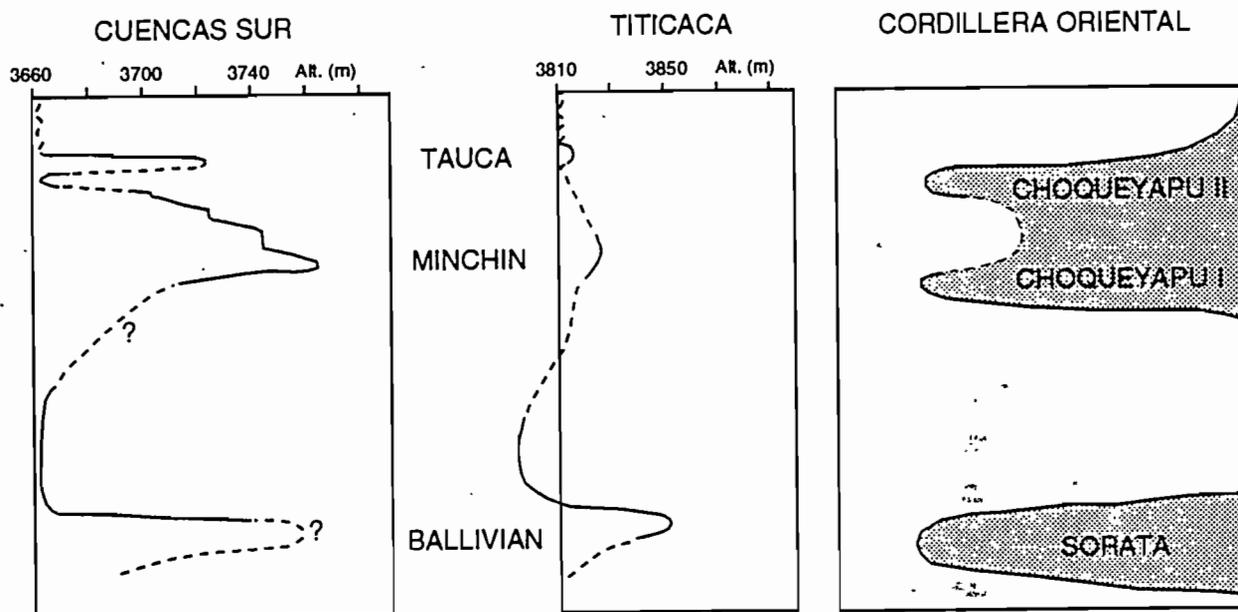


Figura 1. Correlaciones entre los niveles de los lagos y de los glaciares de Bolivia a fines del Cuaternario (según Lavenu *et al.*, 1984).

En el presente artículo, nos proponemos hacer el punto sobre los últimos datos de orden paleohidrológico obtenidos sobre los medios acuáticos *s.l.* que han caracterizado los paisajes del Altiplano boliviano. Las reconstituciones propuestas se apoyan en datos que provienen de 3 medios de sedimentación: el lago Titicaca, los salares de las cuencas Sur, así como los valles de la cordillera oriental.

ZONA DE ESTUDIO Y CLIMA

El Altiplano de Bolivia, situado a 3650-3900 m de altura aproximadamente, se encuentra en el corazón de los Andes (66-71° de longitud Oeste y 14-22° de latitud Sur) entre las cordilleras oriental y occidental que culminan a más de 6000 m (Figura 2). Tres grandes cuencas lacustres caracterizan a esta vasta depresión en vías de terraplenamiento desde el Terciario (Lavenu, 1992):

- la cuenca del lago Titicaca, al Norte.
- la cuenca del lago Poopó, al centro, y
- las cuencas de los salares de Coipasa y de Uyuni, al Sur.

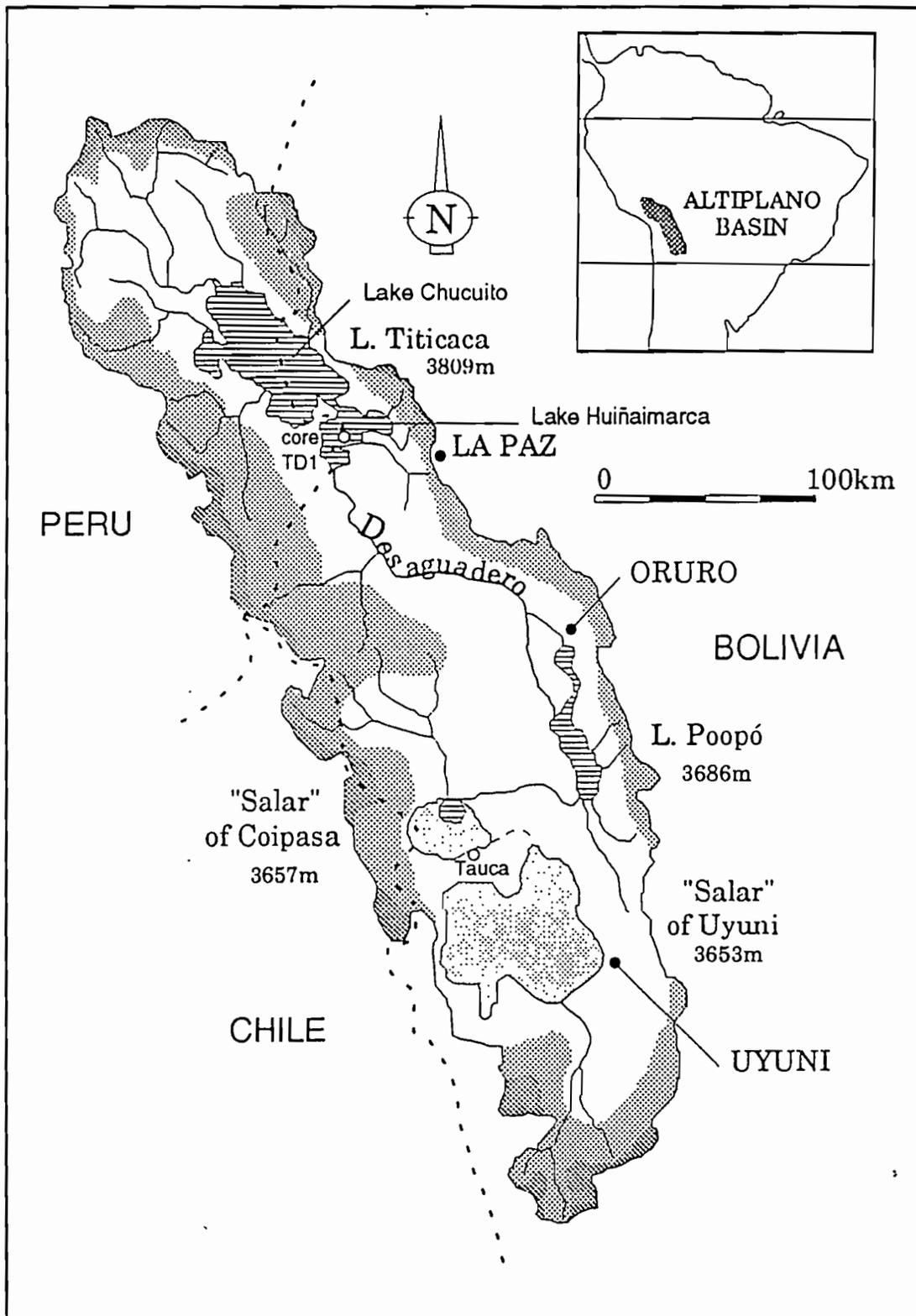


Figura 2. Localización de los principales lugares de estudio.

Los sedimentos son variados y están constituidos por depósitos arcillosos, limosos a arenosos incluso pedregoso de orígenes lacustre, eólico o fluvial, de depósitos carbonatados de origen biogénico... Esta variedad prueba condiciones de sedimentación muy diferentes. Desde el final del Terciario hasta el actual, una alternancia de depósitos, generalmente imputables a cambios climáticos, rellenan las cuencas del Altiplano. En particular, los cambios que intervinieron en el régimen pluvial ocasionaron precipitaciones de yeso hace aproximadamente 8000 BP en el lago Titicaca (Wirmann & Oliveira Almeida, 1987) o, por el contrario, se señalan por líneas de paleoribera datados de 13 790 años BP a alturas de 3770-3780 m, es decir aproximadamente 120-130 m arriba del nivel actual de los salares de Coipasa y Uyuni (Bills *et al.*, 1994).

Hoy en día, las extensiones lacustres *s. l.* (Titicaca, Poopó, Coipasa y Uyuni) son el reflejo del gradiente pluviométrico muy marcado que existe entre el Noreste (Cordillera oriental, cuenca del lago Titicaca) y el Suroeste del Altiplano (Cordillera occidental, cuenca del salar de Uyuni); las precipitaciones pasan de más de 800 mm.año⁻¹ a menos de 200 mm.año⁻¹, mientras que la evaporación estimada pasaría de valores cercanos a 1500 mm.año⁻¹ al Norte a 2000 mm.año⁻¹ al Sur (Roche *et al.*, 1992; Grosjean, 1994). Así, el nivel del lago Poopó está íntimamente ligado al del lago Titicaca vía el caudal del río Desaguadero (Figura 3).

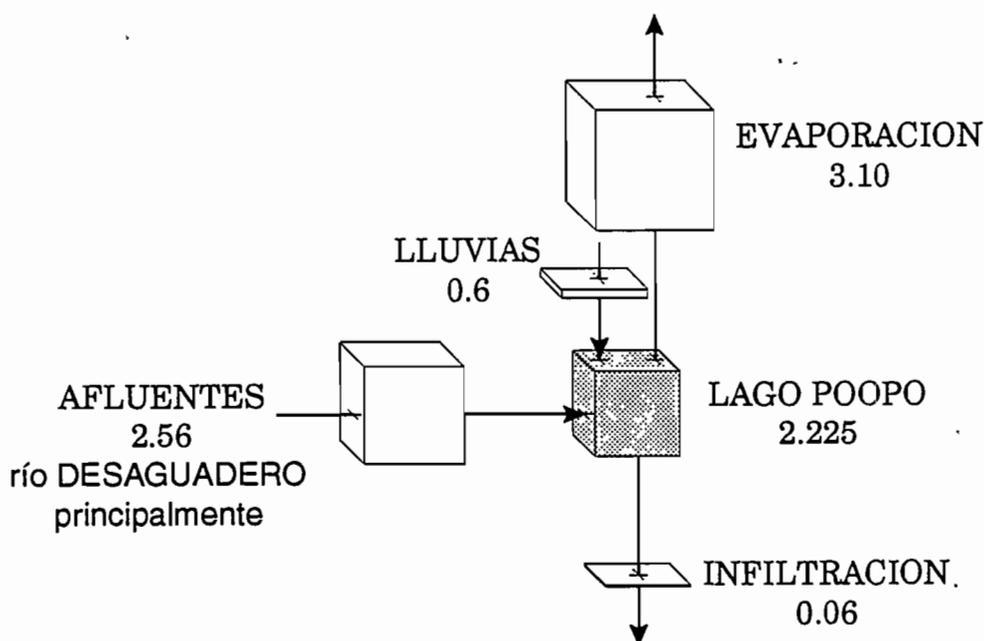


Figura 3. El equilibrio hídrico medio anual del lago Poopó (según Carmouze *et al.*, 1978).

Estos gradientes climáticos son la consecuencia del desplazamiento en latitud, en dirección del Sur, de la zona de convergencia intertropical o ZCIT que alcanza los Andes durante los meses del verano austral, de diciembre a marzo. Los vientos de sector Este y la anomalía térmica caliente que constituye el Altiplano en esta estación favorecen las penetraciones frecuentes del aire húmedo proveniente de la Amazonia. Esto ocasiona precipitaciones de carácter tempestuoso, cada vez más episódicas a medida que se aleja del Norte de la cuenca. Opuestamente, durante la estación seca (invierno austral), la ZCIT se desplaza hacia el Norte. Las fluctuaciones de los vientos de Oeste permiten solamente penetraciones esporádicas del aire húmedo amazónico, que provocan precipitaciones aisladas y de baja densidad (Taljaard, 1972).

METODOS

Con el objeto de reconstruir escenarios paleohidrológicos de un pasado relativamente reciente (< 25 000 años BP), hemos analizado varios tipos de registros provenientes de grandes unidades geomorfológicas del Altiplano: el lago Titicaca, las cuencas Sur y los valles de los Andes.

El lago Titicaca ha proporcionado el registro más completo sobre aproximadamente 25 000 años BP. La muestra TD1, de 5,40 m de longitud, fue extraída por debajo de 19 m de altura de agua en el lago Huiñaimarca (Figura 2). La sedimentología (Wirrmann & Oliveira Almeida, 1987), la palinología (Ybert, 1992) así como el estudio de los ostrácodos (Mourguiart & Roux, 1990; Mourguiart *et al.*, 1992) permitieron la reconstitución de la paleohidrología de esta cuenca lacustre. De una manera sintética, las diferentes facies sedimentarias se reparten en el lago Titicaca en función de la dinámica litoral, de la actividad biológica y de la altura de agua (Boulangé *et al.*, 1981; Wirrmann & Rodrigo, 1992). Los pólenes y las esporas tienen una distribución que también depende de la batimetría pero también de la temperatura atmosférica, o más exactamente de la altura (Ybert, 1992). La repartición de los ostrácodos, organismos esencialmente béticos, depende, en el lago Titicaca, de la naturaleza del substrato, de la repartición de los macrofitos, de la energía, del tenor en oxígeno disuelto de la interfase agua-sedimento, etc., términos estrechamente correlacionados a la profundidad de agua (Mourguiart & Carbonel, 1994). Si bien los estudios sedimentológicos y palinológicos permitieron reconstruir cualitativamente incluso semi-cuantitativamente las variaciones de los niveles del lago Titicaca y de la temperatura atmosférica desde hace 25 000 años BP (Wirrmann *et al.*, 1992; Ybert, 1992), los ostrácodos sirvieron de trama para un enfoque cuantificado del problema planteado por las reconstituciones paleohidrológicas (Mourguiart & Roux, 1990; Mourguiart *et al.*, 1992; Mourguiart & Carbonel, 1994).

Las cuencas Sur proporcionaron registros sedimentarios radicalmente diferentes, tal vez por su carácter discontinuo. Los depósitos estudiados que se reparten en el perímetro de las 3 cuencas principales (Poopó, Coipasa y Uyuni) se presentan esencialmente en forma de sedimentos carbonatados (costras microcristalinas induradas, biohermes vegetales impropriamente llamados "stromatolitos", horizontes ricos en Characeae, en moluscos, etc.) arcillosos o limosos ("diatomitas", niveles limosos a arenosos). Un número importante de dataciones fue obtenido en los depósitos calcarios en función de su posición altitudinal, dando así una idea de la evolución batimétrica de los planos de agua.

Los valles andinos conservaron la huella de las glaciaciones anteriores y de los diferentes tipos de escurrimientos que se sucedieron a través del tiempo. Dataciones ^{14}C permitieron precisar la edad de los acontecimientos. Así, en los casos más favorables, edades máximas y mínimas permiten enmarcar la edad en que apareció una morrena frontal correspondiente al máximo avance de un glaciar o el de un episodio de sedimentación detrítica espesa.

RESULTADOS

El lago Titicaca - Los resultados de la muestra TDI se encuentran en la figura 4. Dos tipos de información fueron obtenidos y corresponden a las estimaciones relativas a la temperatura y a la altura de agua en el momento del depósito del sedimento. Las tendencias evolutivas mayores fueron fechadas con ayuda de 7 dataciones ^{14}C (una convencional, laboratorio de Orsay, Francia, y 6 AMS, laboratorio Beta Analytic, Miami, Estados Unidos; Wirmann & Mourguiart, 1995).

La parte inferior de la muestra (540-200 cm) se caracteriza por bajos niveles lacustres. El lago Huiñaimarca tiene un nivel que oscila entre 3790 y 3795 m de altura (Figura 4), valores que deben compararse con el nivel actual de 3809 m. La temperatura media atmosférica reconstruida también a partir de los datos palinológicos es en promedio 3,5 a 4°C inferior a la temperatura actual con un período de enfriamiento intenso (~ -6°C) entre 20 000 y 19 000 años BP (Ybert, 1992; niveles 360-300 cm de la Figura 4).

A ~ 200 cm de la punta de la muestra existe un importante hiato de sedimentación, poco visible a la observación de la litología pero evidente tomando en cuenta las edades obtenidas por ambas partes. Aproximadamente 3 milenios parecen faltar, entre 18 000 y ~ 15 000 años BP. Esta laguna sedimentaria es sinónimo de sequía marcada.

De 200 a 155 cm (~ 15 000 - 8000 años BP), el nivel medio del lago Huiñaimarca se eleva. La palinología así como el bajo índice de sedimentación no permiten precisar el nivel máximo alcanzado por el lago durante esta fase húmeda ni

delimitar su edad radiométrica, que se sitúa alrededor de $13\,180 \pm 130$ años BP. Este acontecimiento es aparentemente sincrónico de la fase llamada "Tauca" bien localizada en el Sur del Altiplano (Servant & Fontes, 1978; *cf. infra*). El inicio de este episodio lacustre está marcado por temperaturas más bajas que la Actual (-2°C). Más allá, la palinología no proporciona ninguna información respecto a las temperaturas medias atmosféricas porque, probablemente, las variaciones permanecieron bajas que no ocasionaron más cambios significativos en la vegetación local. El fin del episodio está marcado por el desecamiento del lago Huiñaimarca, desecamiento que se tradujo a nivel sedimentológico en un depósito de yeso (Wirrmann & Oliveira Almeida, 1987; Wirrmann *et al.*, 1988).

De 155 a 10 cm, las paleoprofundidades son reconstruidas a partir de una función de transferencia ostrácodos/batimetría (Mourguiart *et al.*, 1992; Figura 4). De 155 a 85 cm, los niveles lacustres permanecen muy bajos con oscilaciones importantes en la cima de esta ecozona. Hacia los 85 cm (~ 3900 años BP), aumenta enormemente el nivel del lago Huiñaimarca. Luego, el nivel va a mantenerse relativamente alto con, no obstante, breves episodios secos, uno de los cuales muy marcado, fechado de ~ 2300 años BP (Mourguiart *et al.*, 1992).

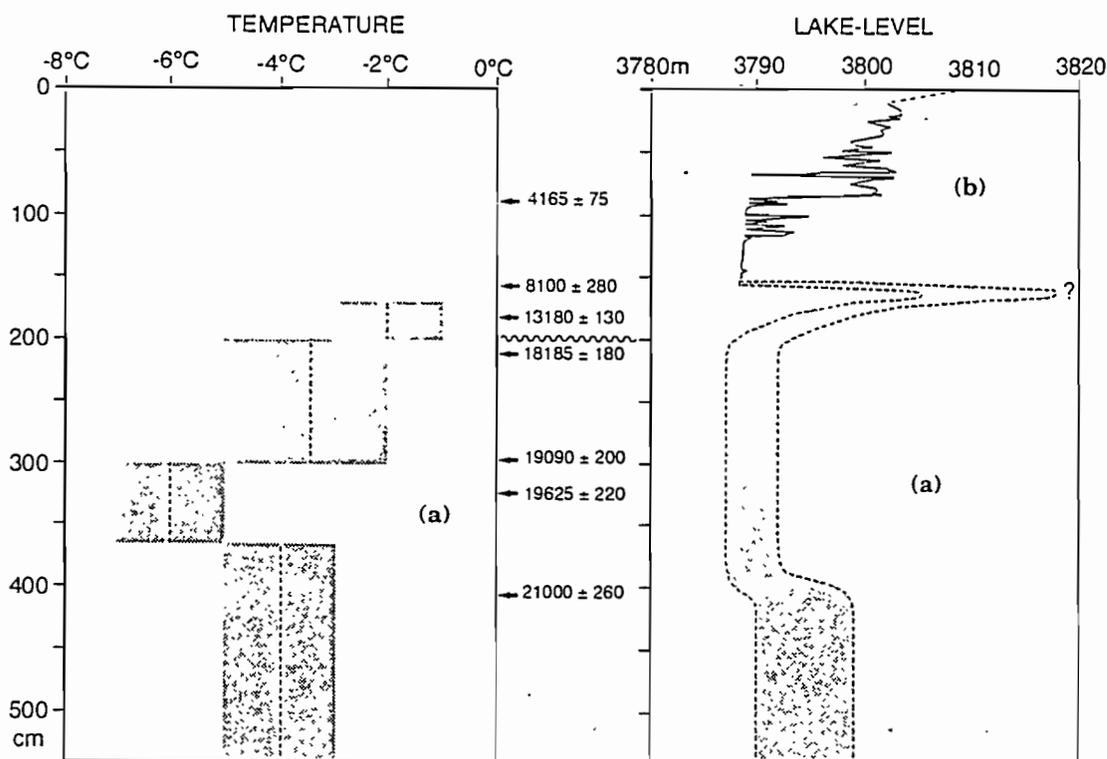


Figura 4. Paleotemperaturas y paleoniveles lacustres de los últimos 25 milenarios reconstruidos a partir (a) del análisis del polen (según Ybert, 1992); y (b) del análisis de las faunas de ostrácodos (Mourguiart *et al.*, 1992).

De 10 cm a la punta de la muestra TDI, la ausencia de ostrácodos no permite reconstruir cuantitativamente la evolución de los niveles del lago Huiñaimarca. La ausencia de ostrácodos caracteriza hoy en día las zonas profundas del lago, como el sitio de extracción de la muestra TDI. No obstante, podemos concluir que el lago apenas ha alcanzado su nivel actual recientemente.

Las cuencas del Sur - En la figura 5 aparecen las relaciones edades/altura. Las edades fueron establecidas a partir de organismos fosilizados y de depósitos carbonatados (moluscos, biohermes vegetales y costras microcristalinas). No tomamos en cuenta el efecto de reservorio; es decir que además las edades dadas deben ser consideradas como edades máximas. No obstante, debe observarse que al nivel del lago Titicaca existe una diferencia del orden de 4 siglos entre las edades obtenidas en carbonatos y las de materia orgánica (Curtis *et al.*, 1993).

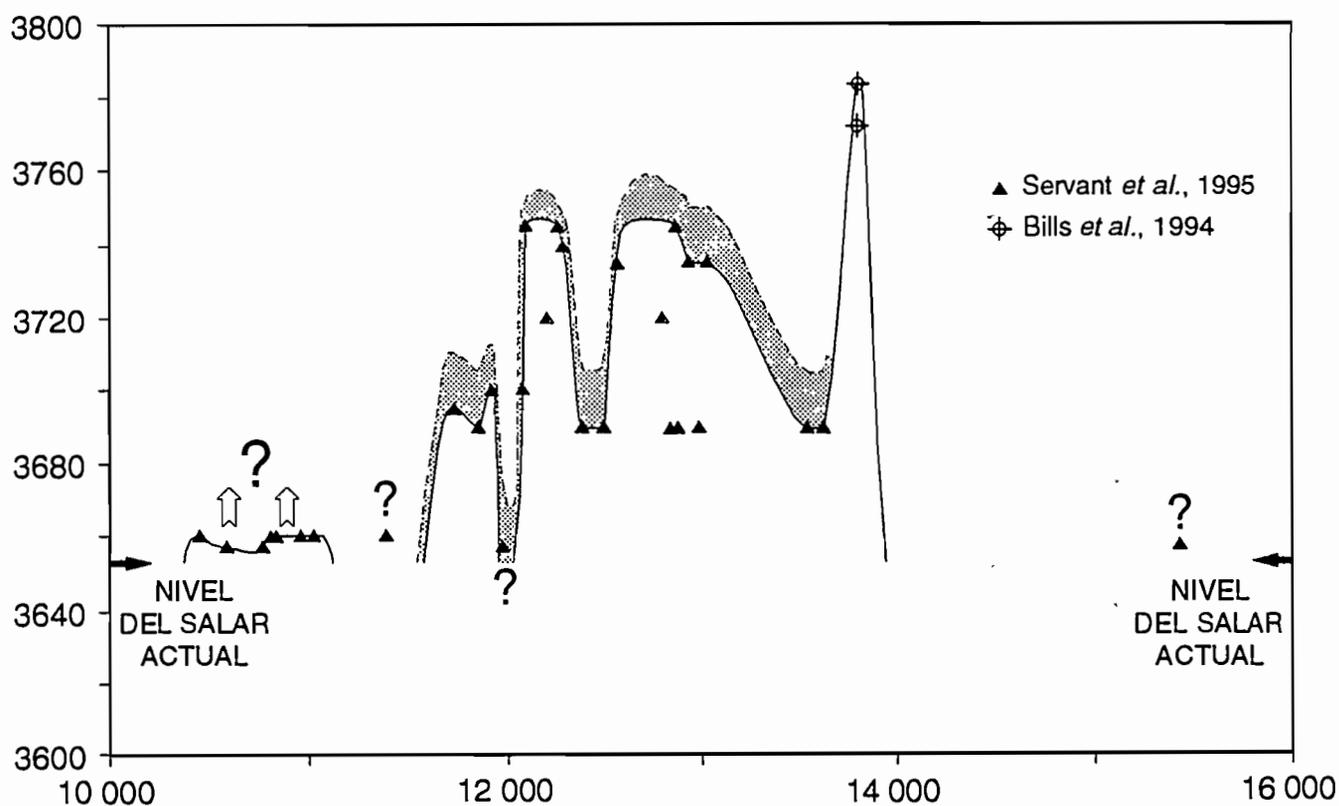


Figura 5. Fluctuaciones de los niveles del "lago Tauca" durante el Tardi-Glaciario según los datos de Servant *et al.*, 1995, y de Bills *et al.*, 1994.

A partir de numerosas edades obtenidas, es posible reconstruir la evolución de los niveles del lago Tauca. Sin embargo, la curva deducida representa un mínimo, ya que los depósitos y organismos carbonatados se depositaron forzosamente en alturas de agua variables. Con excepción de las edades que datan de una línea de ribera (Bills *et al.*, 1994; Figura 5) y las obtenidas a partir de costras microcristalinas induradas (Servant *et al.*, in press; edades < 11 500 años BP de la figura 5), la mayoría de las dataciones ^{14}C fue obtenida en macrofitos (characées o biohermes indiferenciados). En el sistema hidrológico actual del Altiplano, la extensión de la zona eufótica, que evidentemente depende de la transparencia de las aguas, varía del Norte al Sur como sigue: hasta 15-17 m en el lago Chucuito, hasta 7,5-8m en el lago Huiñaimarca y 3-3,5 m en el lago Poopó (Collot *et al.*, 1983; Iltis & Mourguiart, 1992). Por consiguiente, es posible proporcionar una curva-envoltura para la evolución de ciertos niveles del lago "Tauca" considerando como máximo la profundidad de 15-17 m susceptible de ser colonizada por vegetales fijados (Figura 5).

La fase lacustre "Tauca" parece más compleja en su evolución de lo que se habían supuesto los primeros autores (Servant & Fontes, 1978; Figura 1). Los niveles alcanzados por los paleolagos Poopó, Coipasa y Uyuni en el paroxismo del acontecimiento húmedo eran también más elevados.

En resumen, la fase lacustre Tauca se extendió de ~ 14 000 a 10 500 años BP (no tomamos en cuenta aquí la única edad obtenida alrededor de 15 000 años BP por Servant *et al.*, 1995, edad que según nosotros requiere ser confirmada). En el transcurso de este acontecimiento húmedo, se produjeron oscilaciones de gran magnitud, en términos de balance hídrico.

Los valles de la Cordillera Oriental - Los acontecimientos glaciares de fines del Cuaternario están bien conservados en la morfología de los valles andinos por la presencia de numerosos grupos de morrenas. La cronología de estos depósitos fue establecida por dataciones ^{14}C en material orgánico (turbas). Fue posible identificar 4, incluso 5, grupos de morrenas (Figura 6).

- Un primer grupo de morrenas M1a se sitúa aproximadamente a 20 km de los glaciares actuales. La posición cronológica de este conjunto es imprecisa pero parece posterior a 23 000 años BP.

- Un segundo complejo llamado M1b, situado a aproximadamente 2-3 km río arriba de la morrena M1a, está datado de 14 300 años BP. En ciertos valles, el avance glacial que corresponde a esta fase M1b retrabajó de nuevo los depósitos anteriores (morrena M1a), lo que demuestra la gran amplitud de este acontecimiento. Actualmente, este episodio es considerado en los Andes Centrales como el último

máximo glaciar (Gouze *et al.*, 1986; Argollo *et al.*, 1987; Clapperton, 1993a; Seltzer, 1994).

- Otro grupo de morrenas llamado M2, presente en la mayoría de los valles, se sitúa a 7-8 km del anterior es decir a aproximadamente 10 km río abajo de los glaciares actuales. La posición cronológica de esta morrena no es conocida con precisión.

- Las morrenas llamadas M3 están situadas cerca de las anteriores (2-3 km río arriba) y son datadas anteriores a 10 500 - 10 000 años BP. Existen fuertes conjeturas para decir que este acontecimiento, también localizado en los Andes del Perú, es sincrónico del *Younger Dryas* (Clapperton, 1993b; Francou *et al.*, 1995).

- Un último paquete de morrenas está presente a solamente 0,5-1 km de los glaciares actuales. Corresponde al período llamado *Little Ice Age* (o Pequeña Edad de Hielo), período que data de los siglos XVI y XIX (Thompson *et al.*, 1986).

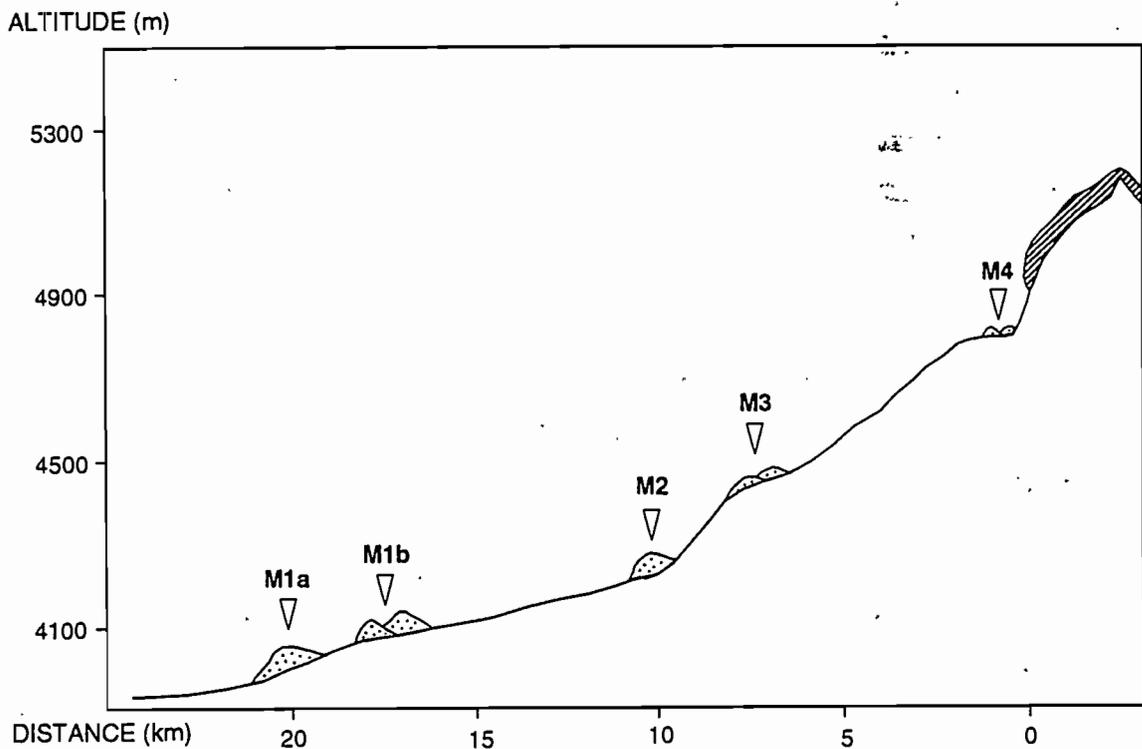


Figura 6. Diagrama sintético mostrando la posición de las morrenas en el glaciar y durante el neoglaciar (según Gouze *et al.*, 1986).

Por otro lado, el estudio de los depósitos fluviales que se sitúan río abajo de las secuencias morrénicas, muestra que las precipitaciones evolucionaron durante los últimos 30 milenios, entre un régimen torrencial favorable a la erosión y un régimen más regular favorable a la acumulación de sedimentos finos en los bajos fondos. Así, fueron identificadas 3 fases de erosión generalizada y fechados cerca de 17 000 - 13 500 años BP, de 7500 - 6000 años BP y posteriormente a 1500 o 500 años BP (Servant & Fontes, 1984).

DISCUSION

Los datos obtenidos son difícilmente comparables entre ellos, y esto por diferentes razones:

- la sedimentación es muy diferente de un sitio a otro; a nivel del lago Titicaca, tenemos un registro casi completo mientras que los otros datos tienen un carácter eminentemente fragmentario;

- las dataciones ^{14}C fueron obtenidas en material carbonatado y en materia orgánica de diversos orígenes; las edades deducidas no son forzosamente compatibles entre ellas;

- la complejidad de las situaciones hidrológicas así como la magnitud de los fenómenos climáticos.

No obstante, es posible sacar ciertas conclusiones. Parece que la fase lacustre "Tauca" (Servant & Fontes, 1978), bien documentada a nivel de las cuencas del Sur (paleolagos Poopó, Coipasa y Uyuni), es sincrónicas de una oscilación positiva de los balances en agua del lago Titicaca (Figura 4). Con referencia al esquema hidroclimático actual (ver la figura 3), es totalmente legítimo pensar que el lago Titicaca ha fluctuado de manera importante entre ~ 14 000 y ~ 10 500 años BP a semejanza de las cuencas del Sur (Figura 5). Por otra parte, la limitación impuesta por la precisión relativa de las edades radiométricas no permite correlacionar los acontecimientos lacustres de la fase Tauca (Figura 5) a las pulsaciones de los glaciares de la Cordillera oriental de los Andes de Bolivia (Figura 6). Sin embargo, los 2 tipos de registros revelan historias complejas; asimismo, es razonable pensar, contrariamente a lo que había sido adelantado por Servant & Fontes (1978), una simultaneidad entre avance de los glaciares y oscilaciones positivas de los lagos. En todo caso es el esquema que parece haber prevalecido durante la Pequeña Edad del Hielo (Thompson *et al.*, 1986). Mientras que los glaciares progradaban de 0,5 a 1 km, el lago Titicaca (y probablemente los niveles de los lagos de las cuencas sur) se elevaba algunos metros (Wirrmann & Oliveira Almeida, 1987; Mourguiart, datos no publicados). Es lo que confirman también las informaciones recientes obtenidas a partir de los balances hidrológicos de los glaciares (Ribstein *et al.*, 1995): durante un

año seco (año El Niño), los glaciares retroceden fuertemente así como el lago Titicaca, e inversamente.

CONCLUSION

La evolución paleoclimática, deducida de la paleohidrología (Figuras 4, 5 y 6), del Altiplano boliviano desde aproximadamente 25 000 años BP parece ser mucho más compleja de lo que supusieron los primeros autores. Puede ser resumida como sigue:

- de 25 000 a 18 000 años BP, desecamiento progresivo del lago Huiñaimarca; este acontecimiento correspondería al final de la fase Minchin localizada en las cuencas sur (Steinmann *et al.*, 1904; Servant & Fontes, 1978); avance glaciar hacia 19 000 años BP? (morrena M1a);

- de 18 000 a 15 000 años BP, ninguna información disponible, ni al Norte, ni al Sur del Altiplano; fase climática seca;

- de ~ 14 000 (o 14 500) a ~ 10 500 años BP, fase lacustre Tauca y avances glaciares (morrenas M1b, M2 y M3);

- de ~ 10 500 a 8000 años BP, nuevo desecamiento del lago Huiñaimarca acompañado de un retroceso rápido de los glaciares (Seltzer, 1992; Francou *et al.*, 1995);

- de 8000 a 3900 años BP, mejoramiento muy ligero de los balances en agua del lago Huiñaimarca;

- de 3900 años BP a ?, ascenso sensible de los niveles del lago Huiñaimarca, sin embargo, con fases secas breves pero importantes;

- de ? a 0 años BP, la Pequeña Edad de Hielo (morrena M4) y el período actual están marcados por una evolución concertada de los lagos y de los glaciares.

Por regla general, parece que, en el conjunto del período pasado, las tendencias evolutivas de los lagos y de los glaciares han sido paralelas. Asimismo, habrá que recibir las cuantificaciones de los paleobalances hidrológicos y climáticos (Hastenrath & Kutzbach, 1985; Kessler, 1988) ya que los niveles lacustres alcanzados durante el paroxismo de la fase Tauca fueron más importantes que los dados anteriormente (Servant & Fontes, 1978). Las nuevas evaluaciones deberían aproximarse a las estimaciones dadas por Grosjean (1994) para el extremo sur del Altiplano (salar de Atacama).

REFERENCIAS CITADAS

- ARGOLLO, J., GOUZE, Ph., SALIEGE, J. F. & SERVANT, M. 1987. Fluctuations des glaciers de Bolivie au Quaternaire récent. *Géodynamique*, 2 (2), 103-104.
- BILLS, B.G., de SILVA, S.L., CURREY, D.R., EMENGER, R.S., LILLQUIST, K.D., DONNELLAN, A. & WORDEN, B. 1994. Hydro-isostatic deflection and tectonic tilting in the central Andes: Initial results of a GPS survey of Lake Minchin shorelines. *Geophysical Research Letters*, 21 (4), 293-296.

- BOULANGE, B., VARGAS, C. & RODRIGO, L. A. 1981. La sédimentation actuelle dans le lac Titicaca. *Rev. Hydrobiol. trop.*, **14** (4), 299-309.
- BOWMAN, I. 1909. The physiography of the Central Andes. *Amer. Journ. Sci.*, **4** (28), 373-402.
- CARMOUZE, J.P., ARZE, C. & QUINTANILLA, J. 1978. Circulación de materia (agua - sales disueltas) através del sistema Pluvio-lacustre del Altiplano: la regulación hídrica é hidroquímica de los lagos Titicaca y Poopó). *Cahiers ORSTOM, Série Géologie*, **10** (1), 49-68.
- CLAPPERTON, C.M. 1993a. *The Quaternary Geology and Geomorphology of South America*. Elsevier, Amsterdam.
- CLAPPERTON, C.M. 1993b. Glacier readvance in the Andes at 12 500-10 000 yr BP: implications for mechanism of Late-glacial climatic change. *Journal of Quaternary Science*, **8** (3), 197-215.
- COLLOT, D., KORIYAMA, F. & GARCIA, E. 1983. Répartitions, biomasses et productions des macrophytes du lac Titicaca. *Rev. Hydrobiol. trop.*, **16** (3), 241-261.
- CURTIS, J.H., HODELL, D.A., BRENNER, M. & BINFORD, M.W. 1993. Little Ice Age Recorded in Sediments from Lake Titicaca, Bolivia. *Eos*, Fall meeting, 118-119.
- FRANCOU, B., MOURGUIART, Ph. & FOURNIER, M. 1995. Phase d'avancée des glaciers au Dryas récent dans les Andes du Pérou. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **320**, 593-599.
- GOUZE, Ph., ARGOLLO, J., SALIEGE, J. F. & SERVANT, M. 1986. Interprétation paléoclimatique des oscillations des glaciers au cours des 20 derniers millénaires dans les régions tropicales; exemple des Andes boliviennes. *C. R. Acad. Sc. Paris, Série II*, **303** (3), 219-224.
- GROSJEAN, M. 1994. Paleohydrology of the Laguna Lejía (north Chilean Altiplano) and climatic implications for late-glacial times. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **109**, 89-100.
- HASTENRATH, S. & KUTZBACH, J. 1985. Late Pleistocene climate and water budget of the South American altiplano. *Quaternary Research*, **24**, 249-256.
- ILTIS, A. & MOURGUIART, Ph. 1992. Higher plants: Distribution and biomass. In: C. Dejoux & A. Iltis (eds.), *Lake Titicaca. A synthesis of Limnological Knowledge, Monogr. Biol.*, **68**, 241-252, Kluwer Academic Publishers.
- KESSLER, A. 1988. Die Schwankungen des Wasserhaushaltes de südamerikanischen Altiplano and las Weltklima. *Jahrbuch der Geographischen Gesellschaft zu Hannover*, 139-159.
- LAVENU, A. 1992. Formation and geological evolution. In: C. Dejoux & A. Iltis (eds.), *Lake Titicaca. A synthesis of Limnological Knowledge, Monogr. Biol.*, **68**, 3-15, Kluwer Academic Publishers.
- LAVENU, A., FORNARI, M. & SEBRIER, M. 1984. Existence de deux nouveaux épisodes lacustres quaternaires dans l'Altiplano péruvo-bolivien. *Cahiers ORSTOM, Série Géologie*, **14** (1), 103-114.
- MOURGUIART Ph & CARBONEL P. 1994 - A quantitative method of palaeolake-level reconstructions using ostracod assemblages : an example from the Bolivian Altiplano. *Hydrobiologia* , **288**: 183-193.
- MOURGUIART, Ph. & ROUX, M. 1990. Une approche nouvelle du problème posé par les reconstructions des paléoniveaux lacustres : utilisation d'une fonction de transfert basée sur les faunes d'ostracodes. *Géodynamique*, **5** (2), 151-165.
- MOURGUIART, Ph., WIRRMANN, D., FOURNIER, M. & SERVANT, M. 1992. Reconstruction quantitative des niveaux du petit lac Titicaca au cours de l'Holocène. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **315**, Série II, 875-880.
- RIBSTEIN, P., TIRIAU, E., FRANCOU, B. & SARAVIA, R. 1995. Tropical climate and glacier hydrology: a case study in Bolivia. *Journal of Hydrology*, **165**, 221-234.
- ROCHE, M. A., BOURGES, J., CORTES, J. & MATTOS, R. 1992. Climatology and hydrology of the Lake Titicaca basin. In: C. Dejoux & A. Iltis (eds.), *Lake Titicaca. A synthesis of Limnological Knowledge, Monogr. Biol.*, **68**, 63-88, Kluwer Academic Publishers.
- RODRIGO, L. A. & WIRRMANN, D. 1992. General aspects of present-day sedimentation. In: C. Dejoux & A. Iltis (eds.), *Lake Titicaca. A synthesis of Limnological Knowledge, Monogr. Biol.*, **68**, 23-28, Kluwer Academic Publishers.
- SELTZER, G. O. 1992. Late Quaternary glaciacion of the Cordillera Real, Bolivia. *Journal of Quaternary Science*, **7**, 87-98.
- SELTZER, G. O. 1994. A lacustrine record of Late Pleistocene climatic change in the subtropical Andes. *Boreas*, **23**, 105-111.
- SERVANT, M. & FONTES, J. Ch. 1978. Les lacs quaternaires des hauts plateaux des Andes boliviennes Premières interprétations paléoclimatiques. *Cahiers ORSTOM, Série Géologie*, **10** (1), 9-23.
- SERVANT, M. & FONTES, J. Ch. 1984. Les basses terrasses fluviales du quaternaire récent des Andes boliviennes. Datations par le ¹⁴C. Interprétation paléoclimatique. *Cahiers ORSTOM, Série Géologie*, **14** (1), 15-28.
- SERVANT, M., FOURNIER, M., ARGOLLO, J., SERVANT-VILDARY, S., SYLVESTRE, F., WIRRMANN, D. & YBERT, J.P. 1995. La dernière transition glaciaire/interglaciaire des Andes tropicales sud (Bolivie) d'après l'étude des variations des niveaux lacustres et des fluctuations glaciaires. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **320**, 729-736.

- STEINMANN, G., HOK, H. & BISTRAM, A. 1904. Zür Geologie des suedestland Bolivien. *Zbl. Miner.*, 5, 1-4.
- TALJAARD, J.J. 1972. Synoptic meteorology of the southern hemisphere. In: *Meteorology of the Southern Hemisphere*, Newton, C.W. (ed.), *Meteorol. Monogr.*, 13, 139-213.
- THOMPSON, L.G., MOSLEY-THOMPSON, E.P., DANSGAARD, W. & GROOTES, P.M. 1986. The "Little Ice Age" as recorded in the stratigraphy of the Quelccaya ice cap. *Science*, 234, 361-364.
- WIRRMANN D. & MOURGUIART Ph. 1995. Late Quaternary spatio-temporal limnological variations in the Altiplano (South America). *Quaternary Research*, 43, 344-354.
- WIRRMANN, D., MOURGUIART, Ph. & de OLIVEIRA ALMEIDA, L. F. 1988. Holocene sedimentology and ostracodes repartition in Lake Titicaca. Paleohydrological interpretations. In: Rabassa, J. (ed.), *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula*, 6, 89-127, Balkema, Rotterdam.
- WIRRMANN, D. & de OLIVEIRA ALMEIDA, L. F. 1987. Low Holocene level (7700 to 3650 years ago) of Lake Titicaca (Bolivia). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 59, 315-323.
- WIRRMANN, D., YBERT, J.P. & MOURGUIART, Ph. 1992. A 20,000 years paleohydrological record from Lake Titicaca. In: C. Dejoux & A. Iltis (eds.), *Lake Titicaca. A synthesis of Limnological Knowledge, Monogr. Biol.*, 68, 40-48, Kluwer Academic Publishers.
- YBERT, J. P. 1992. Ancient lake environments as deduced from pollen analysis. In: C. Dejoux & A. Iltis (eds.), *Lake Titicaca. A synthesis of Linnological Knowledge, Monogr. Biol.*, 68, 49-60, Kluwer Academic Publishers.

ORSTOM BOLIVIA

INFORME N° 47

Noviembre 1995

CONVENIO ORSTOM - UMSA



ACTIVIDADES REALIZADAS EN EL MARCO DEL
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES GEOLOGICAS

compilación por
Michel Fornari
Co-Director

ORSTOM

L'INSTITUT FRANCAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE POUR LE DEVELOPPEMENT EN COOPERATION