

DESPUES DEL PHICAB

UN NUEVO PROYECTO HIDROLOGICO CON ORSTOM

Pierre RIBSTEIN⁽¹⁾, *Robert HOORELBEKE*⁽¹⁾, *Eric TIRLAU*⁽¹⁾
Edgar SALAS R.⁽²⁾, *Jose CORTEZ M.*⁽³⁾

(1) ORSTOM, C.P. 9214, La Paz, Bolivia

(2) IHH, C.P. 699, La Paz, Bolivia

(3) SENAMHI, C.P. 10993, La Paz, Bolivia

INTRODUCCION

En este artículo se presenta el nuevo proyecto que, para los hidrólogos de ORSTOM, viene a continuación del programa PHICAB. Se trata del programa PECA (Precipitaciones y Escurrimientos de Cuencas Andinas). Es un programa desarrollado con los mismos asociados principales que el programa PHICAB, es decir el IHH (Instituto de Hidráulica e Hidrología de la UMSA), el SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología) y ORSTOM (Instituto Francés de Investigación Científica para el Desarrollo en Cooperación).

PECA es un programa de investigación complementario del PHICAB que se desarrollará en torno a tres prioridades:

- * *un objetivo*, la comprensión y la representación de los procesos vinculados al escurrimiento y al transporte de materias;
- * *una zona de estudio*, los Andes y el Altiplano, río arriba de la cuenca amazónica estudiada en el marco del PHICAB;
- * *una herramienta de análisis*, la modelización hidrológica, único medio para extrapolar los resultados en el tiempo y en el espacio.

Como zona de estudio fue elegida, para empezar, la región de La Paz. Se trata, en efecto, de la zona más poblada de los Andes de Bolivia, y también se trata de una región que tiene problemas de agua: lluvias devastadoras, fuertes crecidas en terrenos con gran tendencia a la erosión y, finalmente, dificultades de alimentación en agua potable durante la estación seca. Las tres etapas más importantes del ciclo del agua en la zona elegida son estudiadas en el programa PECA:

- * *las precipitaciones*. El tema a abordar concierne a la influencia del relieve sobre las precipitaciones;
- * *los escurrimientos y el transporte de sedimentos*. Se trata de analizar el devenir de las precipitaciones, la parte de las lluvias que se infiltra y la relación entre aguacero, crecidas y transporte de sedimentos en zonas de mucho declive;
- * *la hidrología de un glaciar tropical*. Esta parte del programa debe permitir conocer los diferentes parámetros que explican el balance hidrológico de un glaciar tropical en Bolivia.

Los párrafos siguientes presentan en detalle las tres partes del programa PECA, pero antes insistiremos sobre el tema general, común a estas tres partes: la hidrología de altas montañas tropicales. Es un tema poco abordado en la literatura hidrológica y, sin embargo, es un tema importante; los resultados del PHICAB (Roche *et al.*, 1992; Guyot, 1992) mostraron que la explicación de los fenómenos observados en el llano amazónico debe buscarse en la hidrología de las cuencas andinas.

Se trata de una investigación que puede catalogarse básica, sin embargo el programa PECA debería también aportar importantes resultados interesantes para el desarrollo de la región. Un mejor conocimiento de la hidrología en la región de La Paz conducirá a una mejor administración y abastecimiento del agua en la ciudad.

LAS PRECIPITACIONES EN ZONA DE MONTAÑA

Los fenómenos meteorológicos que rigen a las precipitaciones sobre los Andes son bastante conocidos (Johnson, 1976; Ronchail, 1986). En cambio, pocos estudios se han referido a la variabilidad espacial y a la evolución temporal de los eventos de lluvias, trabajando en pequeñas escalas de tiempo y de espacio.

A partir de datos de la cuenca del río La Paz, incluyendo la ciudad de La Paz, el estudio realizado trata del régimen de las lluvias y su variabilidad. Esta cuenca, de una superficie de alrededor de 500 km² en puente de Aranjuez (ver figura 1), está equipada de una treintena de estaciones pluviométricas y varias estaciones pluviográficas. En el marco de PECA, un primer trabajo consistió en crear el banco pluviométrico y pluviográfico de datos, gracias al paquete PLUVIOM del ORSTOM. Una vez captados y analizados los datos, el estudio concierne a los parámetros estadísticos del régimen de las lluvias utilizando sobre todo los datos de las estaciones más largas, como la del observatorio San Calixto (Segaline Nieto y Cabre, 1988) que posee más de 75 años de datos pluviométricos y 35 años de datos pluviográficos. Los resultados de esta parte del estudio se presentarán en forma de valores de lluvia y períodos de retorno correspondientes en diferentes intervalos de tiempo. Se debe resaltar por ejemplo que no existe ningún estudio detallado de las curvas intensidad-duración-frecuencia, válidas para los Andes de Bolivia. La búsqueda de tendencias estadísticas sobre las largas series de datos, permitirá estudiar los cambios del clima (relación con el fenómeno "El Niño - Oscilación Sur" o influencia de la urbanización de La Paz sobre el régimen de las lluvias por ejemplo).

Las precipitaciones observadas en los treinta pluviómetros, repartidos en la cuenca de La Paz, permiten estudiar la variabilidad espacial de la lluvia, la influencia de la altura y de la exposición de los valles. Por medio de los instrumentos de la geoestadística (funciones splines, kriging), es posible conocer la distancia de decorrelación de datos de las estaciones pluviométricas, y comparar esta distancia a la variabilidad de parámetros del relieve por ejemplo; la figura 1 ilustra este párrafo mostrando las isoyetas anuales del período 1985-1991 (isoyetas calculadas en años hidrológicos que comienzan en el mes de septiembre). Al norte y al este de la cuenca, no hay suficientes estaciones de observaciones para poder trazar isoyetas. En esta figura se debe observar el trazado de las isoyetas que pone en evidencia el valle del río La Paz.

Al norte de la cuenca del río La Paz se sitúa el valle de Zongo, de dirección sur-norte, mientras que el valle de La Paz está orientado aproximadamente norte-sur. Entre el centro de La Paz y un punto situado en la misma altura en el valle de Zongo, hay alrededor de treinta kilómetros. La comparación de las lluvias en los valles del río Zongo y del río La Paz está representada en la figura 2. Las masas de aire húmedo que vienen de la Amazonia llegan por el norte y suben el valle de Zongo desaguándose, lo que explica lluvias más débiles en lo alto del valle de Zongo que en lo bajo. Estas mismas masas de aire, ya bastante desaguadas, atraviesan la cordillera a cerca de 5000 m de altura, luego bajan el valle del río La Paz. Bajando el valle de La Paz, las masas de aire húmedo continúan desaguándose, lo que explica el gradiente de La Paz opuesto al gradiente de Zongo en la figura 2. Se debe observar que el gradiente entre precipitaciones y altura es bien marcado en el caso del río Zongo, mientras que los valores en el valle del río La Paz están muy dispersos, pero todavía muy inferiores a las lluvias en el valle de Zongo en una misma altura.

Las figuras 1 y 2 dan ejemplos de los resultados esperados del programa PECA para esta parte de estudio de las lluvias. Sólo se trata de resultados preliminares, pues hasta ahora el trabajo se consagró esencialmente a la instalación del banco de datos pluviométricos y pluviógrafos, y a la administración de estos datos.

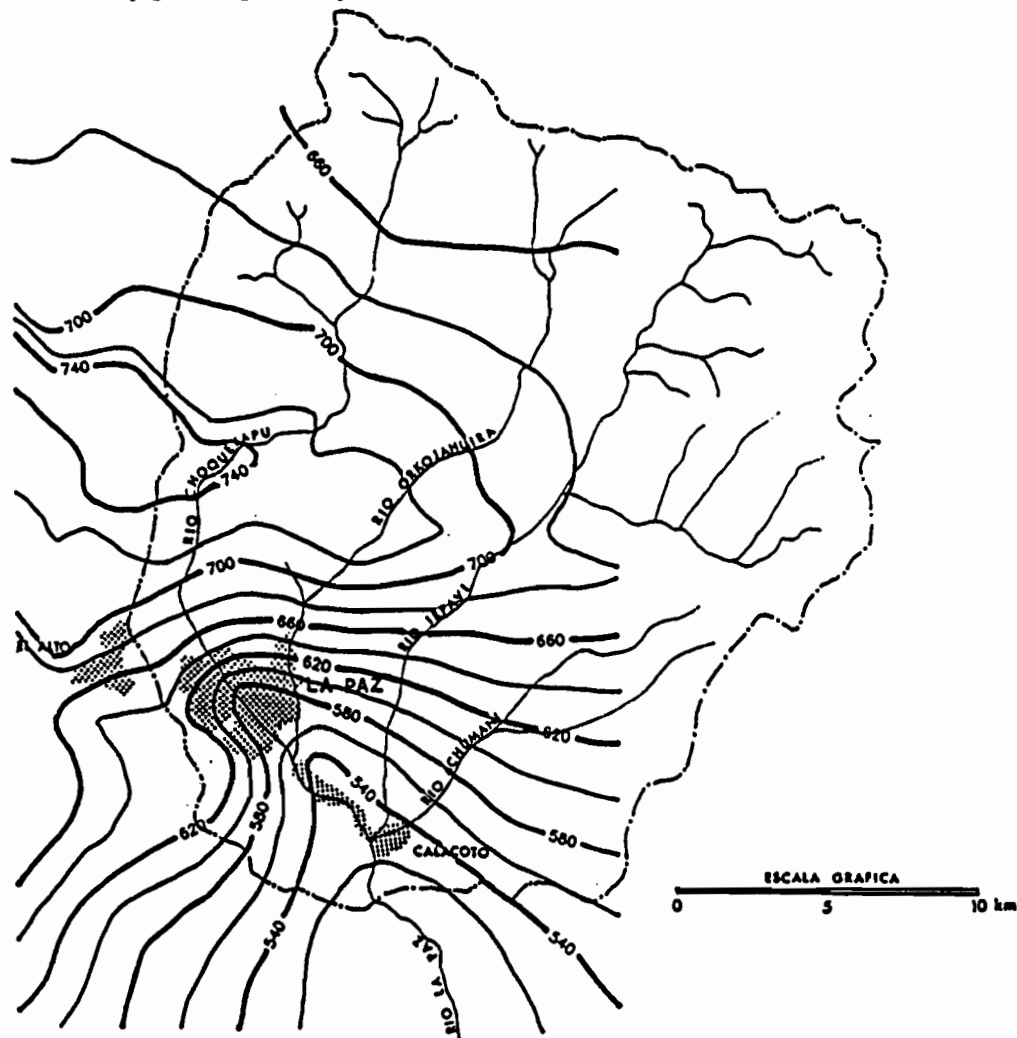


Figura 1: Cuenca del río La Paz en el puente de Aranjuez. Mapa de las isoyetas anuales del período 1985-1991.

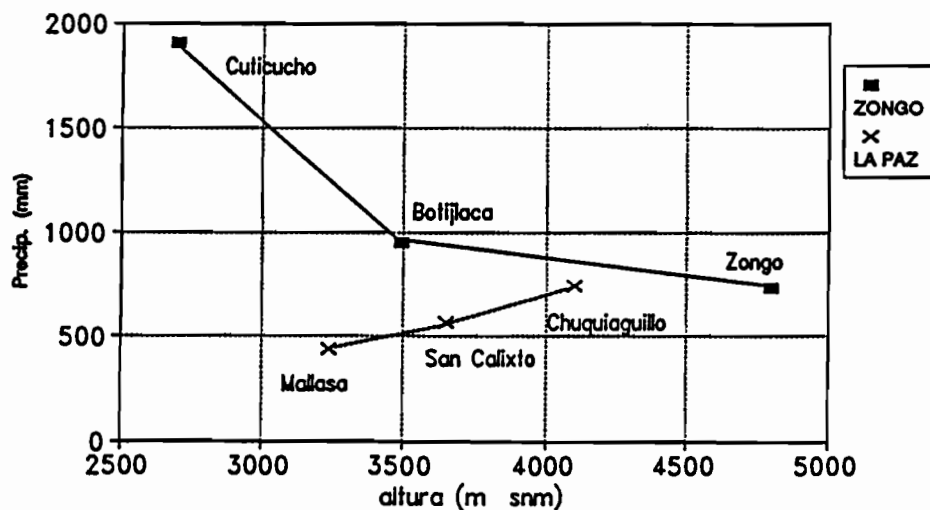


Figura 2: Relación entre las lluvias anuales (1985-1991) y la altura y la orientación de los valles de los ríos La Paz y Zongo

HIDROLOGÍA Y FLUJO DE MATERIA DE PEQUEÑAS CUENCAS

Para comprender la génesis de los escurrimientos y de los flujos de materia en el llano amazónico, los hidrólogos que trabajan en el marco del proyecto PHICAB, comenzaron en 1989 un estudio hidrológico del río Achumani, afluente del río La Paz (Guyot y Bourges, 1989). El río Achumani, que drena los barrios sur de la ciudad de La Paz (ver plan de situación en la figura 1, y mapa de cuenca en la figura 3), fluye por capas sedimentarias del Plio-Cuaternario que proporcionan lo esencial de las materias en suspensión del río Alto-Beni (Guyot, 1992). Este estudio se realiza gracias a la colaboración entre ORSTOM y la Alcaldía de La Paz (DICOMAC, Dirección de Control y Manejo de Cuencas, HAM), y los resultados esperados deben permitir dimensionar mejor las obras de protección contra las inundaciones y estudiar el impacto de las medidas contra la erosión aplicadas a la cuenca (reforestación, algunas presas de contención de sedimentos y canalización de los dos afluentes del río Achumani en una distancia total de 3 km aproximadamente).

En el marco de este estudio, las dos estaciones hidrométricas instaladas controlan cuencas de 17.5 km² y de 38.9 km². Las cuencas estudiadas presentan una influencia antrópica débil, recubiertas de pasto en la parte río arriba y poco cultivadas en el fondo de los valles. La geomorfología de las cuencas fue analizada gracias a un Modelo Numérico de Terreno (MNT), es decir con representación numérica de un campo de alturas conocidas en los nudos de una red regular. El MNT utilizado proviene de la numerización de las curvas de nivel de los mapas topográficos a escala 1/50 000, utilizando el programa DEMIURGE (Depraetere, 1992). Este trabajo ha permitido analizar el mapa de las pendientes de las cuencas: en la gran cuenca, la tercera parte de la superficie presenta una pendiente superior a 36 %, y las pendientes pronunciadas se sitúan en la parte intermedia de la cuenca, entre las vertientes poco inclinadas río arriba y un valle alargado, río abajo (ver Bourges *et al.*, 1992). La figura 4 muestra los resultados provenientes de un archivo derivado del MNT, el de las distancias a la salida. Esta figura representa el perfil longitudinal generalizado de la cuenca, es decir, la relación distancia a la salida-altura de todos los ríos que drenan una superficie superior a 0.18 km². Como en el análisis hecho con el mapa de las pendientes encontramos que: de río arriba a río abajo existe una meseta seguida de una parte intermediaria de pendiente pronunciada para terminar por valles alargados y poco inclinados. Es pues la parte intermediaria la que estará más propensa a la erosión.

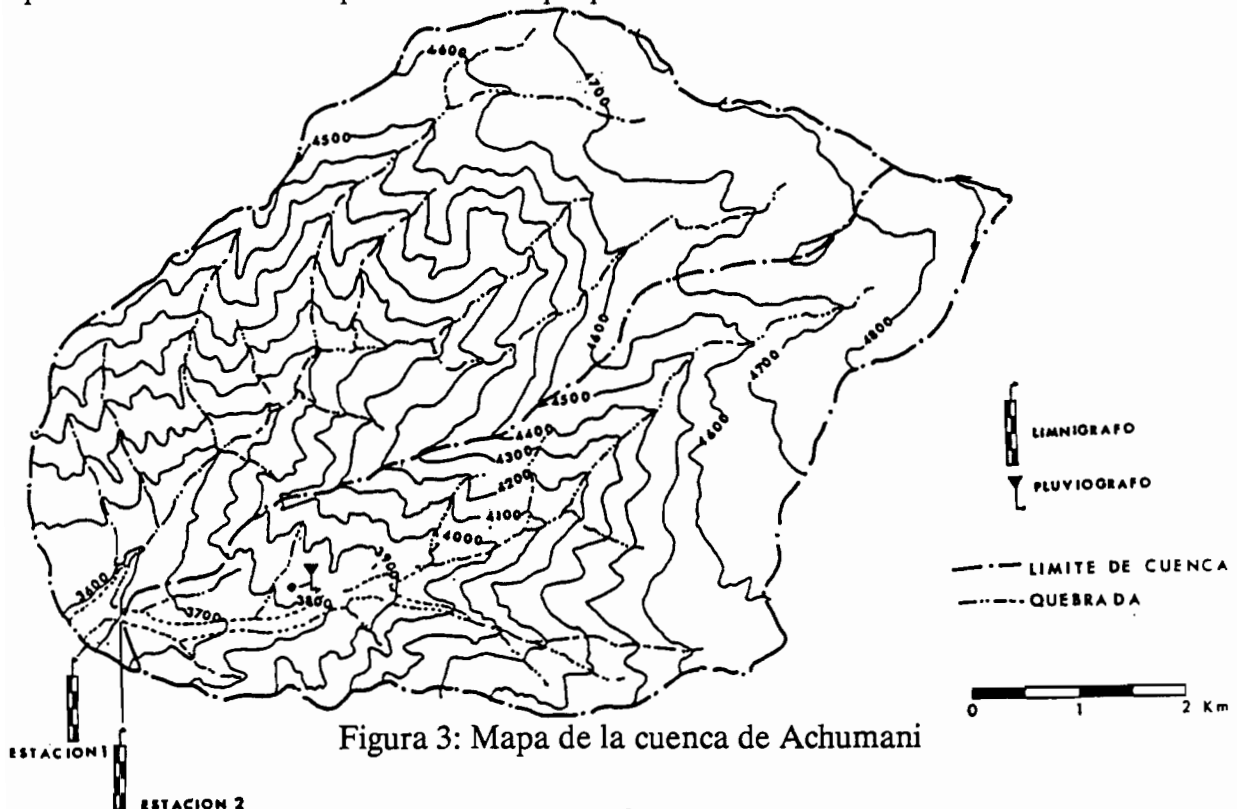


Figura 3: Mapa de la cuenca de Achumani

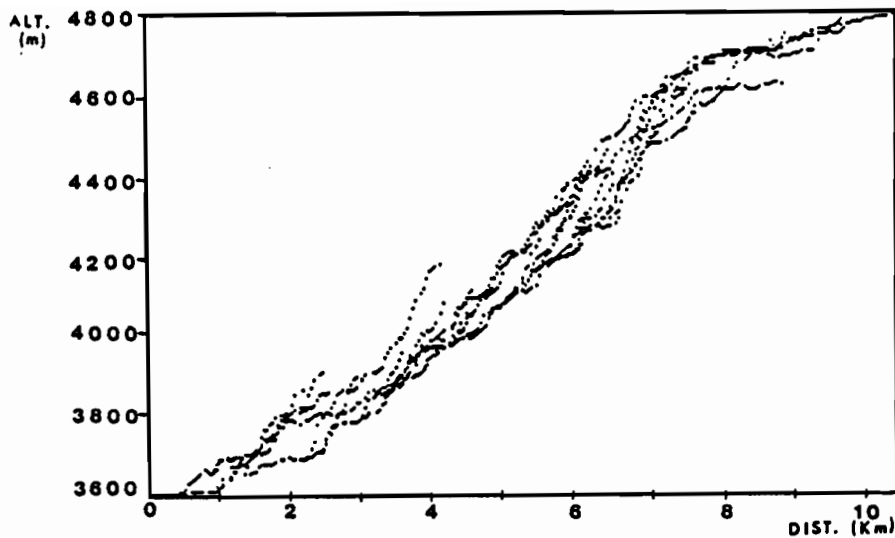


Figura 4: Perfil longitudinal generalizado de la estación 1 de Achumani para superficie drenada superior a 0.18 km²

Los datos desde 1987 del pluviógrafo de la estación de Millipunku fueron comparados a los datos de San Calixto (Bourges *et al.*, 1992). A nivel mensual, la correlación entre las dos estaciones es buena, lo que permitirá extrapolar los datos de Millipunku a partir de la larga serie de San Calixto. Los valores anuales en Millipunku son 12% superiores a los de San Calixto. Un análisis más detallado muestra que esta diferencia viene de un mayor número de días de lluvias, medias a bajas, más que lluvias diarias más fuertes.

Estudiando los datos de los dos años hidrológicos disponibles (1989-1990 y 1990-1991), se observa un escurrimiento semejante en los dos años: 182 y 185 mm en la cuenca de Achumani, 210 y 230 mm en la cuenca Huyllani (Bourges *et al.*, 1992). La repartición anual del escurrimiento refleja la irregularidad del régimen de las lluvias. Tomando como referencia las lluvias de la estación de Millipunku, los coeficientes de escurrimiento varían entre 28% y 38% de un año hidrológico al otro y de una cuenca a la otra. A nivel mensual, los coeficientes de escurrimiento varían de 20% a 60% en los meses más lluviosos. La figura 5 representa las láminas mensuales escurridas en función de las lluvias mensuales observadas en Millipunku. Debajo de 30 mm, no hay escurrimiento superficial. Encima de éste límite, el escurrimiento representa en promedio 60% de la lluvia (inclinación de la derecha en la figura 5). Los valores debajo de la recta muestran meses con suelo más bien seco, mientras que los valores encima muestran los meses con suelo saturado por las lluvias anteriores.

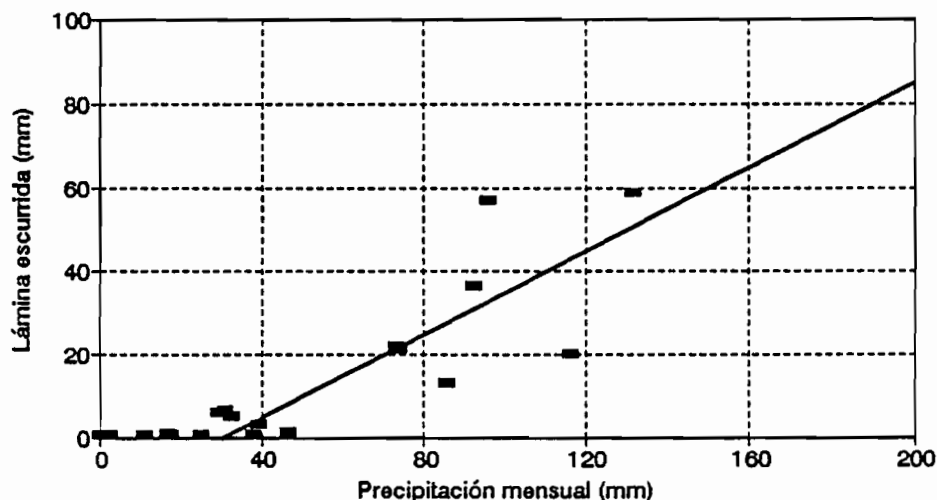


Figura 5: Relación precipitación-lámina escurrida a nivel mensual de la cuenca de Achumani (38.9 km²) - según Bourges *et al.*, 1992 -

Dado el relieve de la cuenca y la irregularidad de las lluvias, las crecidas son rápidas y frecuentemente complejas. Por ejemplo, en febrero de 1990, 32 picos de crecidas superiores a 5000 l.s^{-1} , reagrupadas en 19 días, fueron observadas en la cuenca principal. El caudal máximo observado en la gran cuenca es de 8300 l.s^{-1} (río Achumani) y de 6650 l.s^{-1} en la pequeña cuenca (río Huayllani) (caudales específicos respectivamente de 210 y $380 \text{ l.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$). En este estudio, estas diferentes características de lluvias y de escurrimiento serán correlacionadas a los flujos de materia y a la erosión en las cuencas. Las materias en suspensión presentan concentraciones importantes en el río Achumani, alcanzando $5300 \text{ t.km}^{-2}.\text{año}^{-1}$ (Guyot, 1992). Uno de los objetivos del estudio de la cuenca piloto de Achumani es poner a punto un modelo lluvia-caudal-flujo de materias adaptado a las condiciones particulares de la hidrología de los Andes.

BALANCE HIDROLOGICO DE UN GLACIAR TROPICAL

Considerando que existen pocos estudios hidrológicos de glaciares tropicales, que estos glaciares presentan un retroceso significativo y que los glaciares de la región de La Paz son importantes para la dotación de agua potable a la ciudad, se comprende el interés de un programa de investigación sobre la hidrología de un glaciar del Huayna Potosí (Francou *et al.*, 1992). El trabajo se realiza en colaboración con glaciólogos del CNRS (Francia) y gracias al apoyo logístico de la COBEE (Compañía Boliviana de Energía Eléctrica S.A.). Este estudio complementa los trabajos realizados en el marco del PHICAB y permite precisar el rol de las aguas de los glaciares en el balance hidrológico de las altas cuencas en un dominio de alta montaña tropical.

Para comprender el retroceso de los glaciares tropicales, se deben conocer primero los parámetros explicativos del balance hidrológico de este tipo de glaciar. Un glaciar es considerado como un sistema cuya señal de entrada viene del clima (precipitaciones, temperaturas, radiación) y cuya señal de salida consiste en una variación del volumen de hielo (avance o retroceso del frente) y en una variación del caudal del río (Francou *et al.*, 1992). El glaciar puede dividirse en dos zonas, una de acumulación en la cual la alimentación por las precipitaciones sólidas es dominante, y una zona de ablación en la cual las pérdidas dominan (evaporación, sublimación y derretimiento). Entre las dos zonas, se sitúa la línea de equilibrio (ELA: Equilibrium Line Altitude, en inglés). Para el Huayna Potosí, esta línea está aproximadamente a 5300 m . La zona de acumulación es estudiada por medio de pozos para encontrar la estratificación natural del nevado; la medida del espesor y de la densidad de cada estrato permite evaluar la cantidad, en equivalente-agua, que se acumuló cada año. En la zona de ablación, las medidas se hacen por medio de balizas plantadas en el glaciar, repartidas entre 5200 y 4900 m de altura. El escurrimiento es medido gracias a dos estaciones hidrométricas equipadas de vertederos, una de ellas con un limnógrafo. En la Plataforma de Zongo (4750 m de altura) un termógrafo y un pluviómetro diario proporcionan datos complementarios. La figura 6 presenta diferentes equipos instalados en el glaciar. El equipo meteorológico debería ser complementado desde el año hidrológico 1992-1993 por un segundo termógrafo (para evaluar los gradientes de temperatura en función de la altura), un pluviógrafo y un piranómetro para medir una radiación global.

Los equipos hidrológicos fueron instalados en septiembre 1991. Dado que se posee hasta ahora más de un año hidrológico completo, es posible hacer un balance preliminar. El cuadro 1 presenta los valores medidos en año hidrológico (sept. 1991-agosto 1992) de diferentes sensores instalados en el glaciar. Comparando el escurrimiento observado río abajo del frente (1410 mm) con la pluviometría de la Plataforma de Zongo (665 mm), se tiene una idea del retroceso actual de este tipo de glaciares. No obstante, es necesario matizar esta gran diferencia con dos observaciones: por una parte, las precipitaciones son ligeramente superiores en altura (880 mm observadas con pluviómetro totalizador a 4890 m) y, por otra parte, este año fue excepcional (fenómeno "El Niño - Oscilación Sur") con una lluvia anual deficitaria y fuertes temperaturas.

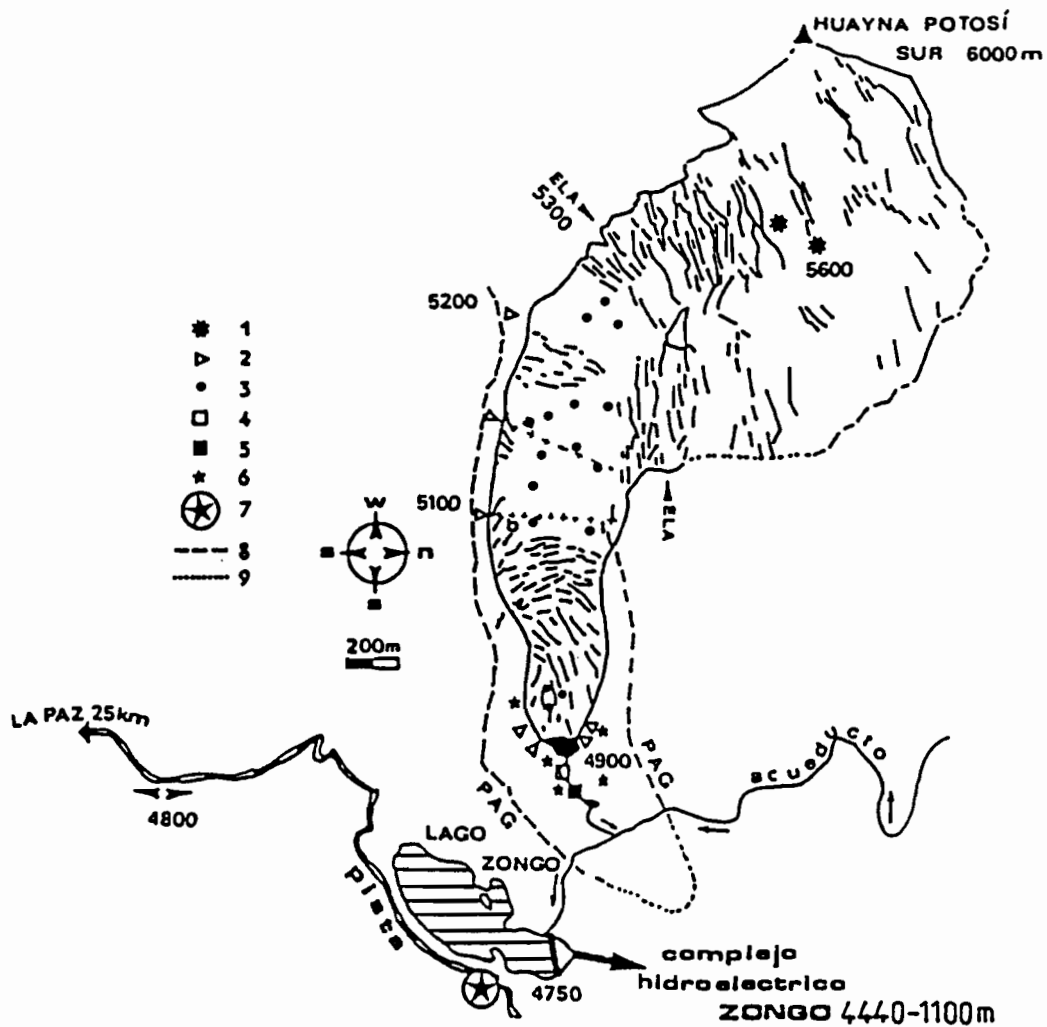


Figura 6: Posición de los diferentes equipos en el glaciar del Zongo.
- según Francou *et al.*, 1992 -

1: sondeos en la zona de acumulación, 2: bases de levantamientos topográficos, 3: balizas de balance-velocidad, 4: estación hidrométrica de Huayna Alto, 5: estación hidrométrica de Huayna Bajo, 6: pluviómetros totalizadores, 7: estación meteorológica de la Plataforma de Zongo, 8: morrena de la Pequeña Edad de Hielo.

Cuadro 1: Balance hidrológico del glaciar del Huayna Potosí desde sept. 1991 hasta agosto 1992 (en mm de agua)

Sensor	Altura	altura de agua
Baliza 4	5120 m	1994 mm
Baliza 15	4910 m	5196 mm
Lámina escurrida	4835 m	1410 mm
Precipitaciones	4750 m	665 mm

Un primer estudio del régimen hidrológico de las aguas del glaciar fue llevado a cabo para el año hidrológico 1991-1992 (figura 7). El escurrimiento mensual observado es bimodal, con un fuerte pico en diciembre y un segundo pico más débil en marzo. Varias observaciones pueden hacerse al ver este gráfico:

- * el escurrimiento es más importante en estación húmeda que en estación seca, debido a temperaturas medias y valores de radiación solar en el límite de la atmósfera más importantes, como se puede ver en la figura 7.
- * el escurrimiento de diciembre, más importante que el de marzo, se explica por la radiación y no por las temperaturas medias que están próximas en estos dos meses.
- * durante la estación de lluvias, los escurrimientos son más escasos en los dos meses más lluviosos (enero y febrero);

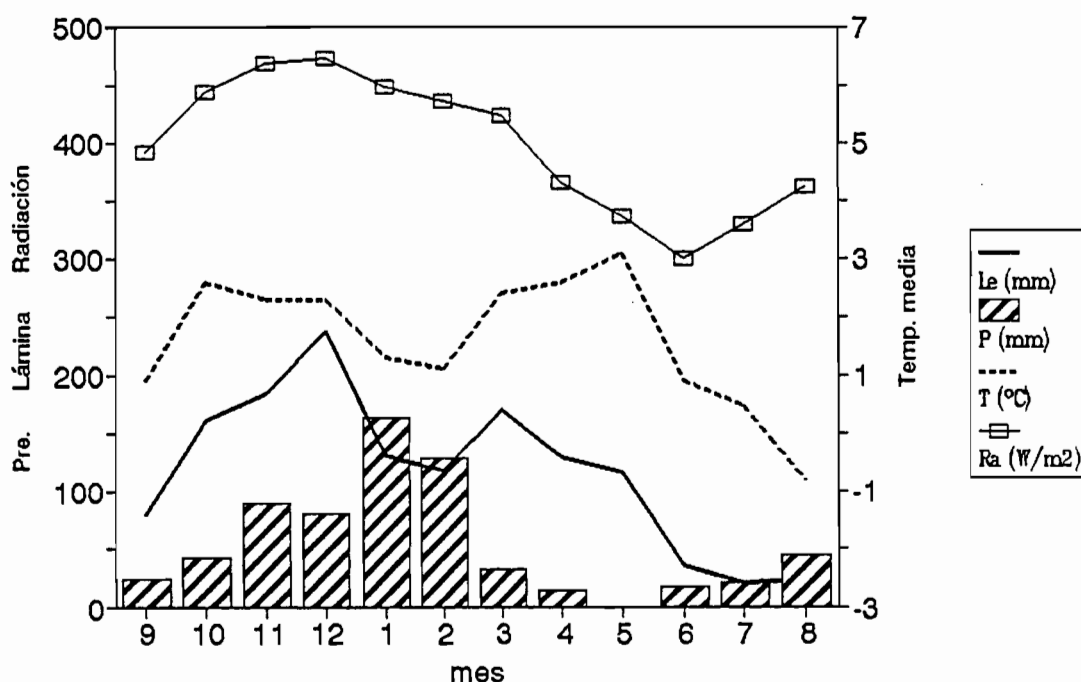


Figura 7: Régimen hidrológico de las aguas de deshielo del glaciar de Zongo 1991-1992

Le altura escurrida en mm, P precipitación en mm a la plataforma de Zongo,
T temperatura media mensual en grados
y Ra radiación en el límite de la atmósfera en $W \cdot m^{-2}$.

Sólo se trata aquí de resultados preliminares. El trabajo se desarrolla actualmente en torno a dos temas:

- * precisar los parámetros explicativos del escurrimiento a nivel diario, gracias a los datos obtenidos por el equipo meteorológico complementario que va a ser instalado;
- * definir mejor el retroceso del glaciar, extrapolando las observaciones en el tiempo con series largas de medidas: temperaturas y precipitaciones en La Paz, niveles de agua en el valle de Zongo, ...

Los resultados obtenidos serán confrontados luego a las medidas de otras cuencas próximas del Huayna Potosí, desde cuencas con superficies de importante porcentaje de hielo hasta cuencas completamente lluviosas. Además, será puesta a punto una modelización hidrológica para predeterminar el escurrimiento de un glaciar tropical a partir de los parámetros explicativos del balance, obtenidos durante este estudio.

CONCLUSION

El programa de investigación PECA presenta en este artículo un programa ambicioso: se trata de comprender y representar las tres partes más importantes del ciclo del agua (precipitaciones, escurrimiento y flujo de materia, hidrología de un glaciar) en los Andes y el Altiplano. Para alcanzar este objetivo, fue elegida una zona test: la región de La Paz y, para cada parte estudiada, fue seleccionada una cuenca. Debido al campo geográfico del estudio (Andes-Altiplano) y por la escala de trabajo (cuencas piloto, pequeños intervalos de tiempo de trabajo), el estudio, desarrollado en el marco de PECA, es complementario a los trabajos realizados por el PHICAB.

El medio estudiado es particular debido a la altura (entre 3200 m y más de 6000 m), al relieve escarpado (inclinación frecuentemente superior a 36 %) y a las características del clima bajo estas latitudes. Un mejor conocimiento de este medio, así como también un análisis de la relación clima-hidrología, son los dos objetivos apuntados por el PECA, objetivos que hay que ubicar en el marco más amplio de los cambios globales del clima.

REFERENCIAS

BOURGES J., RIBSTEIN P., DIETZE C., HOORELBEKE R., CORTEZ J. (1992). Precipitaciones y escurrimiento de una pequeña cuenca en zona de montaña: el río Achumani (La Paz - Bolivia). *In* Los recursos hídricos en Bolivia y su dimensión ambiental, AGID Geoscience, 20: 303-312.

DEPRAETERE C. (1992). DEMIURGE 2.0, Chaîne de production et de traitement de modèles numériques de terrain. Col. Logorstom, ORSTOM (ed.), 197 p.

FRANCOU B., BOURGES J., RIBSTEIN P. VARGAS R. (1992). Un programa de estudio de un glaciar tropical. Aplicaciones en los recursos en agua de una cuenca andina. Informe n° 29, ORSTOM, Bolivia, 32 p.

GUYOT J.L. (1992). Hydrogéochimie des fleuves de l'Amazonie bolivienne. Thèse de Doctorat, Géologie-Géochimie, Université de Bordeaux I, 362 p.

GUYOT J.L., BOURGES J. (1989). Projet d'étude du bassin versant d'Achumani, La Paz, Bolivie. Publ. PHICAB, La Paz, 12 p.

JOHNSON A.M. (1976). The climate of Peru, Bolivia, and Ecuador. *In* World Survey of Climatology, vol. 12, H.E. Landsberg (ed.), Elsevier, Amsterdam, 147-218.

ROCHE M.A., Fernandez-Jáuregui C., Aliaga A., Peña J., Salas E., Montaña J.L. (1992). Balance hidrico superficial de Bolivia. Publ. PHICAB, La Paz, 29 p.

RONCHAIL J. (1986). Situations atmosphériques et précipitations comparées sur l'Altiplano et l'Amazonie, Bolivie. Publ. PHICAB, La Paz, 43 p.

SEGALINE NIETO H., Cabre R. (1988). El clima de La Paz. Datos del Observatorio San Calixto. 80 p.