

ANÁLISIS DEL BALANCE DE MASA MENSUAL Y ANUAL
DEL GLACIAR TROPICAL ZONGO (BOLIVIA)

MONTHLY AND ANNUAL MASS BALANCE ANALYSIS
OF THE TROPICAL GLACIAL ZONGO (BOLIVIA)

G. LEONARDINI¹, J-E. SICART², A. RABATEL³, A. SORUCO⁴, P. GINOT⁵, & E. RAMIREZ⁶

¹ IRD, La Paz-Bolivia

² IRD/UJF-Grenoble 1/CNRS/G-INP, LTHE UMR 5564, Grenoble F-38041, France

³ 2UJF-Grenoble 1 / CNRS, LGGE UMR 5183, Grenoble, F-38041

⁴ UMSA, IGEMA, Calle 27, Cota Cota, La Paz, Bolivia

⁵ 4IRD / CNRS / IFSTTAR / Météo France / UJF-Grenoble 1 / Université de Savoie / Grenoble-INP, Observatoire des Sciences de l'Univers Grenoble (OSUG) UMS222, St Martin d'Hères, F-38400, France

⁵ UJF Grenoble 1 / CNRS, Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement (LGGE) UMR 5183, Grenoble, F-38041, France

⁶ UMSA,IHH, Calle 30, Cota Cota, La Paz, Bolivia

(Recibido 24 de Febrero de 2012; aceptado 29 de Junio de 2012)

RESUMEN

Se presenta una estimación del balance de masa del Glaciar Tropical Zongo en Bolivia por dos métodos independientes, así como un análisis de su variabilidad anual y mensual (se entiende por “balance de masa” la cantidad de masa que el glaciar gana o pierde en cierto tiempo). Para este propósito fueron considerados 15 años hidrológicos (1993-2008) y se determinó que los años con balances de masa más deficitarios estaban relacionados con una fuerte ablación y los años con balance positivo con una fuerte acumulación. También se observó que los meses de septiembre a diciembre son los meses de mayor ablación y los meses de enero a marzo los meses de acumulación.

Descriptor: Glaciares — Impacto del cambio climático global

Código(s) PACS: 92.40.vk, 92.70.Mn

ABSTRACT

We present an estimate of the mass balance of the tropical glacier at Zongo-Bolivia (we understand as “mass balance” the mass gained or lost by the glacier in a given time interval); this estimate was carried out by two independent methods. We also analysed the balances annual and monthly variability. We considered 15 hydrological years (1993-2008) and concluded that the years with a negative balance were related to a strong ablation (especially from September to December), and the years with a positive balance related to a strong accumulation (especially from January to March).

Subject headings: glaciers — impacts of global change (climate)

1. INTRODUCCIÓN

Los glaciares tropicales representan el 0.16% de la superficie glaciar del planeta; de este porcentaje el 70% y el 20% corresponden al Perú y a Bolivia respectivamente (Francou et al. 2007). Los glaciares tropicales, que son en su totalidad glaciares de montaña, presentan una respuesta más corta a los cambios medioambientales (Coudrain et al. 2005). Esta fuerte sensibilidad, particularmente al clima,

les ha valido el calificativo de buenos indicadores del clima. Sin embargo, existen pocas observaciones disponibles en los trópicos y particularmente en las zonas de montaña (asociada a una baja densidad de estaciones meteorológicas, observaciones satelitales, etc.) y se tienen pocos estudios sobre las variaciones climáticas en esta región. Colateralmente, se encuentran los aspectos sociales, particularmente aquellos relacionados al aprovisionamiento de agua, la generación de electricidad y los riesgos de desastres.

Actualmente, el balance de masa es medido cada año en más de 100 glaciares, y de manera estacional en 40 de estos (WGMS 2007). Estas medidas son parte de una estrategia de seguimiento integrada, de manera que los datos son enviados bajo criterios es-

¹Email: gonzalo.leonardini@hotmail.com

²Email: jean-emmanuel.sicart@ird.fr

³Email: antoine.rabatel@lgge.obs.ujf-grenoble.fr

⁴Email: alvaro.soruco@gmail.com

⁵Email: patrick.ginot@ird.fr

⁶Email: eramirez@accelerate.com

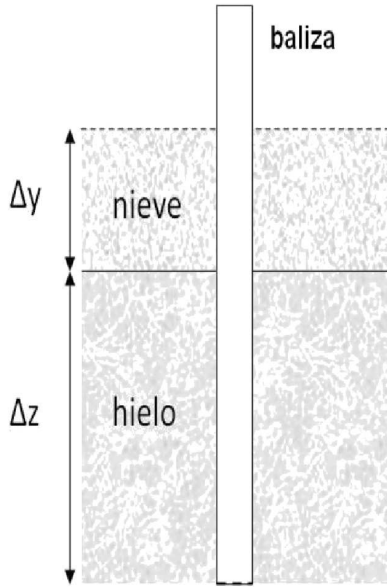


FIG. 1.— Diagrama de la variación de la altura de nieve y hielo en un periodo de tiempo determinado.

pecíficos a WGMS (Word Glaciar Monitoring service). Actualmente, los glaciares Zongo y Charquini Sur de la Cordillera Real en Bolivia son parte de esta red de seguimiento.

La contribución del presente trabajo con relación al vasto trabajo sobre el mismo glaciar, radica en tres aspectos principales: El primero es la estimación de diferentes parámetros y características del glaciar con una serie de datos de 15 años, que consideramos es significativa como referencia para trabajos posteriores; el segundo aspecto es la descripción de las particularidades en la distribución espacial del balance de masa en cuatro años de gran contraste; y el último aspecto tiene que ver con los resultados de balance de masa a nivel mensual, particularmente el balance de masa hidrológico que es mostrado por primera vez y contribuye a la comprensión del funcionamiento del Glaciar Zongo.

2. BALANCE DE MASA

El balance de masa de un glaciar es el cambio de masa del mismo en un determinado intervalo de tiempo, generalmente 1 año hidrológico. Si bien su dimensión es [M] (masa), por compatibilidad con unidades en un contexto hidrológico se expresa en m eq.a. (metros equivalentes de agua). El signo del balance de masa calculado mediante el método glaciológico, B_n , determina dos zonas en la superficie del glaciar: la zona de acumulación (donde $B_n > 0$) y la zona de ablación (donde $B_n < 0$). La línea en la cual se interceptan ambas superficies se denomina Línea de Equilibrio Altitudinal o ELA (Equilibrium Line Altitude) y la razón entre el área de la zona de acumulación y el área total del glaciar se denomina Proporción del Área de Acumulación o AAR (Accumulation Area Ratio). Ambos parámetros descritos anteriormente son importantes por su relación lineal con el balance de masa (Rabatel 2005).

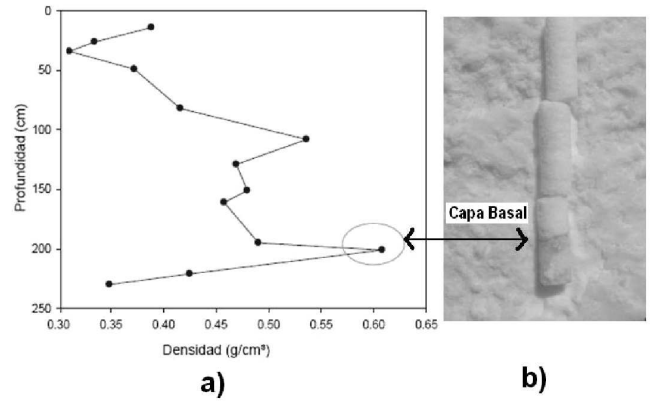


FIG. 2.— (a) Densidad en función de la profundidad para una de las perforaciones en la zona de acumulación del glaciar. La medición corresponde a la acumulación del año hidrológico 2007-2008. (b) Testigo de hielo/nieve en la cual puede identificarse la capa basal.

2.1. Balance de masa glaciológico

Este método se sustenta en la medición directa del espesor de hielo y nieve de la superficie del glaciar en el transcurso de un periodo de tiempo (generalmente de 1 año). Así, en la parte inferior del glaciar, se dispone de una red de balizas para medir mensualmente el proceso de ablación de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$b_n = \rho_0 \Delta z + \rho \Delta y. \quad (1)$$

Donde b_n es el balance de masa, ρ_0 y ρ son las constantes de densidad relativa del hielo (0.9) y la nieve (0.4) respectivamente y Δz y Δy son las variaciones del espesor de hielo y nieve respectivamente. Véase la figura 1.

En la parte superior del glaciar, se realizan dos o tres pozos/perforaciones de nieve/hielo con un perforador PICO (Polar Ice Coring Office) para medir la acumulación (figura 2). El procedimiento consiste en identificar estratigráficamente la capa basal que es la capa partir de la cual se acumula la precipitación sólida correspondiente a un año hidrológico. Esta capa, que corresponde al pico de máxima densidad, puede identificarse visualmente como la capa más oscura del testigo de hielo (figura 2).

A continuación, en i muestras sucesivas desde la superficie hasta la capa basal se estima la masa neta acumulada según la ecuación (2):

$$b_n = \sum_i \rho_i h_i. \quad (2)$$

Donde ρ_i representa la densidad relativa de la muestra de altura h_i .

Finalmente, para calcular el balance de masa en la totalidad del glaciar, se discretizan los valores de balance de masa en 11 rangos altitudinales j (cada 100m) y se pondera cada rango por el área relativa respectiva (balance de masa específico, B_n).

$$B_n = \sum_{j=1}^{j=11} b_n^j \left(\frac{S_j}{S_g} \right) \quad (3)$$

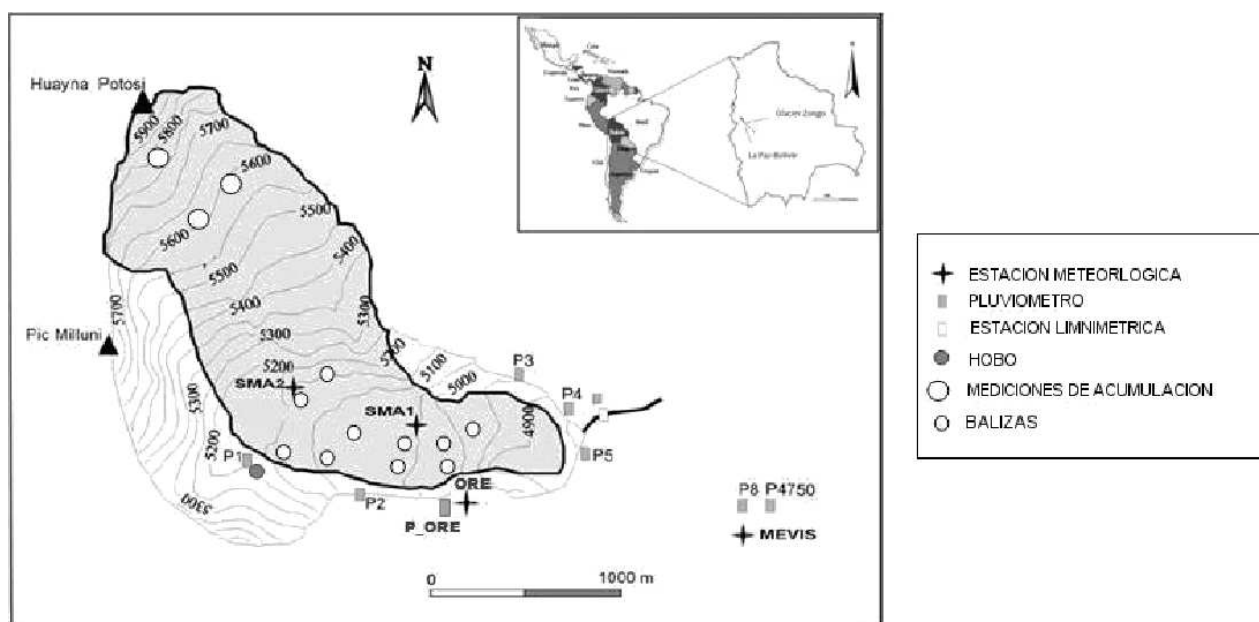


FIG. 3.— Mapa del Glaciar Zongo y equipo instalado sobre el glaciar.

Donde, b_n^j es el balance de masa del rango altitudinal j ; S_j es el área del rango altitudinal j y S_g es el área total del glaciar.

2.2. Balance de masa Hidrológico

El balance hidrológico (B_h) permite la estimación del balance de masa de manera indirecta. Así, si consideramos que el proceso de acumulación es cuantificado por la precipitación (P_g) y el proceso de ablación es cuantificado por la fusión (F_g) y la sublimación (Subl), según Paterson (1994) tenemos:

$$B_h = P_g - F_g - \text{subl} \quad (4)$$

Donde de manera similar al balance de masa glaciológico, los términos son expresados en metros equivalentes de agua (m eq.a.).

Ahora bien, si consideramos despreciable el término de sublimación con respecto al término de fusión, y expresamos la fusión del glaciar en función del caudal medido sobre el emisario del glaciar, tenemos la siguiente expresión (Sicart et al. 2007):

$$B_h = P_g - \frac{1}{S_g} [Q - (S - S_g)ceP_g] \quad (5)$$

Donde Q en m^3/s es el caudal medido por la estación limnigráfica a la salida de la cuenca, S y S_g corresponden a las áreas de la cuenca y del glaciar respectivamente; ce es el coeficiente de escurrimiento que es estimado empíricamente en 0.8 para la cuenca glaciar Zongo (Ribstein et al. 1995).

2.3. Medición de la precipitación

Se ha evidenciado una subestimación de la precipitación sólida medida en los pluviómetros totalizadores a causa de un fenómeno de turbulencia en la parte superior de los mismos (Larson & Peck 1974;

Sicart et al. 2007). Por otra parte, en un reciente trabajo de Soruco et al. (2009) se calcula el balance de masa anual por el método fotogramétrico y se obtiene una buena concordancia entre el mismo y el balance hidrológico. Sin embargo, el balance hidrológico es corregido en +37% en las mediciones de la precipitación. Anteriormente, un criterio análogo de corrección de la precipitación (+50%) para el cálculo del balance hidrológico fue realizado por Sicart et al. (2007). En base a los criterios anteriormente mencionados, proponemos una corrección de +40% a las mediciones mensuales de la precipitación para los pluviómetros de la cuenca, porque es bajo ese porcentaje que la subestimación observada es menos significativa. Más adelante podremos hacer una comparación de tales correcciones de precipitación en el balance de masa hidrológico. Indicamos también que en las mediciones de precipitación de la cuenca glaciar que se realizan entre 4750 y 5150 msnm. No se evidencia un gradiente de precipitación. Por lo tanto, se asume que precipita en la misma cantidad en toda la superficie del glaciar.

3. SITIO DE ESTUDIO, CLIMA Y MEDICIONES

El Glaciar Zongo es un glaciar del nevado Huayna Potosí ($16^{\circ}15'S$ y $68^{\circ}10'W$, 6088 msnm) que forma parte de la Cordillera Real en Bolivia, es un glaciar templado de valle de una superficie de 1.96 km^2 (en 2006, Soruco et al. 2009). Entre 5300 y 6000 msnm el glaciar tiene una pendiente promedio de 22° orientada al sud-este; y entre 4900 y 5300 msnm el glaciar tiene una pendiente de 15° orientada al este (Sicart 2002). En condición de equilibrio (balance de masa nulo) el glaciar presenta una ELA_0 igual a 5150 msnm y un AAR_0 igual a 77%. El nevado Huayna Potosí se ubica en la región tropical externa caracterizada por una marcada estacionalidad de la precipitación y una débil estacionalidad

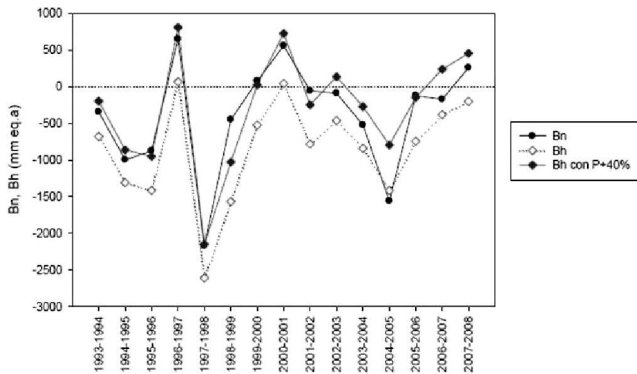


FIG. 4.— Comparación de los balances de masa glaciológico (B_n) e hidrológico (B_h) anuales. B_h con P+40% representa el balance de masa obtenido también por el método hidrológico pero considerando una subestimación del 40% en las mediciones mensuales de la precipitación en los pluviómetros totalizadores.

de la temperatura (Troll 1941). El régimen de precipitación en esta región está determinado por la oscilación de la Zona de Convergencia Inter-Tropical o ITCZ (del inglés Inter Tropical Convergence Zone): entre marzo y septiembre la ITCZ se encuentra al norte de Bolivia y los anticiclones subtropicales producen un clima seco. De octubre a marzo la ITCZ se desplaza hacia el sur incrementando la convección de la humedad producida en la cuenca amazónica, generando así un clima húmedo propicio para la precipitación (Aceituno & Montecinos 1993). La figura 3 muestra la red de balizas de ablación y acumulación, los pluviómetros totalizadores y las estaciones meteorológicas instaladas en la cuenca del glaciar Zongo. Para los 15 años estudiados (1993-2008) la precipitación promedio anual registrada por los pluviómetros totalizadores ubicados en el margen pro-glaciar (figura 3) es de 950 mm de agua con 87% de la precipitación registrada entre octubre y abril y 51% registrada entre enero y marzo.

4. RESULTADOS

4.1. Variabilidad anual del balance de masa

El balance de masa anual observado en el periodo 1993-2008 (figura 4) es en gran medida dependiente de la ablación de los meses de octubre a febrero. Estos meses explican el 91% de la varianza del balance de masa anual. Este resultado es similar al 95% estimado por Francou et al. (2003) para el Glaciar Chacaltaya en los meses de octubre a abril.

A nivel regional, existen indicios que la variabilidad anual del balance de masa esté relacionada a eventos ENSO (EL NIÑO Southern Oscillation) mediante un marcado déficit de precipitación y un aumento de temperatura en su fase negativa o EL NIÑO, y un impacto inverso en su fase positiva o LA NIÑA (Wagnon et al. 2001; Francou et al. 2003). Sicart et al. (2003, 2011) adiciona el aspecto del retraso/adelanto de la época de lluvia en eventos NIÑO/NIÑA que ocasiona fusión/acumulación significativa en meses donde la radiación solar es máxima. Complementariamente, en años donde el ENSO no es significativo y en los meses correspon-

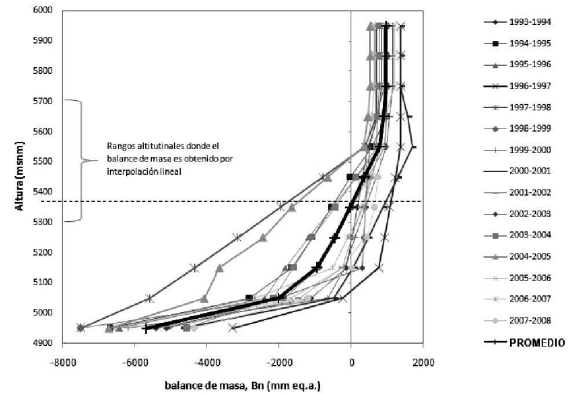


FIG. 5.— Variación del balance de masa con la altitud para el Glaciar Zongo para cada año del periodo 1993-2008. La curva negra representa el promedio de todo el periodo estudiado y la línea horizontal segmentada corresponde a la ELA del mencionado promedio. Entre 5300 y 5700 msnm el balance de masa es calculado por interpolación lineal de los datos obtenidos gracias a las balizas y testigos de hielo.

dientes al periodo seco, el desplazamiento anormal de la ITCZ en dirección norte ocasiona los llamados “surazos” i.e. precipitación en el periodo seco que tiene un impacto en el balance de masa anual (Rabatel et al. (en prep)).

La variabilidad del balance de masa mostrado en la figura 4 es concordante con un aumento de temperatura en los Andes (de 0.7° a 1.3° C) en años donde prevalece el fenómeno de EL NIÑO (Vuille et al. 2003). Al respecto, según Francou et al. (2003), a escala mensual es posible observar una correlación próxima entre la anomalía del balance de masa y la anomalía de la temperatura del aire a 500 hpa (datos de reanálisis); sin embargo, pocos estudios han investigado las causas físicas de tal correlación. Para concluir los comentarios correspondientes a la figura 4, indicamos que mediante la comparación de ambos métodos, podemos constatar que la correlación entre los mismos es significativa ($r^2=0.85$, $n=15$) y que la corrección de la precipitación mencionada en la sección 2.3 tiene un efecto compensatorio en la subestimación de B_h .

La ELA correspondiente al promedio de los 15 años es 5345 msnm ($> ELA_0 = 5150$ msnm) y el gradiente altitudinal en su proximidad es de $1.8 \text{ m eq.a.}(100\text{m})^{-1}$, que coincide con los $2 \text{ m eq.a.}(100\text{m})^{-1}$ estimados por Kaser (2002) para los glaciares tropicales (figura 5). Es importante indicar que la ELA promedio está comprendida en una región donde no se tienen medidas directas del balance de masa, lo que agrega un mayor grado de incertidumbre a este parámetro y sugiere que la red de balizas sea extendida hacia rangos más elevados. A pesar de esta consideración, encontramos una buena correlación entre la ELA y el balance de masa ($r^2=0.85$, $n=15$) y entre la AAR y el balance de masa ($r^2=0.76$, $n=15$); esta característica es concordante con la mayor parte de los glaciares en seguimiento en el mundo (WGMS 2009).

Cuando precisamos el porcentaje de balance de

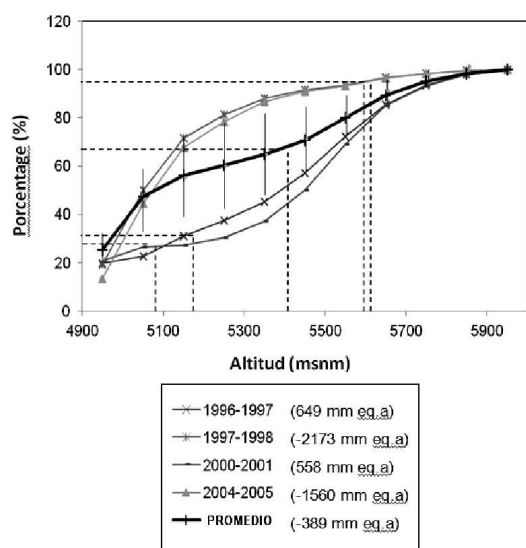


FIG. 6.— Porcentaje del balance de masa acumulado en función del rango altitudinal para 4 años hidrológicos de condiciones climáticas diferentes. En línea negra, el promedio de de todo el periodo de estudio (1993-2008). La línea segmentada precisa la ELA y el porcentaje acumulado para los cuatro años respectivos.

masa acumulado del Glaciar Zongo en función de la altitud para algunos años del periodo estudiado (se consideran los valores absolutos de balance de masa), constatamos que: para aquellos años con balance de masa muy deficitario (1997-1998 y 2004-2005) el balance de masa correspondiente a la zona de ablación representa el 95% del balance de masa total (figura 6). De la misma forma, la zona comprendida entre el rango altitudinal 4900-5300 m representa el 90% del balance de masa total. Este aporte tan significativo de la zona de ablación es debido a que en los años con eventos Niño (caracterizados por temperaturas elevadas y déficit de precipitación), la altitud de la línea de equilibrio se encuentra por encima de los 5500 msnm, delimitando un AAR de 35 y 37% respectivamente. Este aspecto resalta la importancia de la zona de ablación y la importancia de mantener un monitoramiento constante por la red de balizas. Por otra parte, también constatamos que para aquellos años con balance de masa positivo (1996-1997 y 2000-2001) la zona de ablación y el rango altitudinal 4900-5300 msnm representan respectivamente el 30% y 40% del balance de masa anual. Así mismo, las AARs respectivas son 69 y 75%. En síntesis, los balances de masa negativos extremos son debidos a una fuerte ablación y no a una baja acumulación (y viceversa).

4.2. Variabilidad mensual del balance de masa

Valiéndonos de las mediciones mensuales de la ablación en la parte baja del glaciar, de los datos de caudal y de precipitación, a continuación mostramos los resultados correspondientes a la variabilidad mensual del balance de masa.

Los valores mensuales de balances de masa entre 4900-5300 msnm mostrados en la figura 7 están distribuidos de la siguiente manera: de septiembre a diciembre se registran los valores de balances de

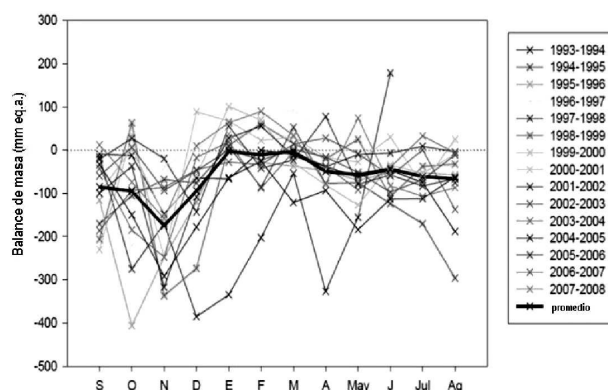


FIG. 7.— Balance de masa glaciológico para el rango altitudinal 4900-5300 m entre septiembre y agosto (Año Hidrológico). En línea negra se representa el promedio de todo el periodo de estudio (1993-2008). El promedio de septiembre a diciembre es -109 mm eq.a. ($s=108$ mm eq.a., $n=52$), de enero a marzo es 3 mm eq.a. ($s=50$ mm eq.a., $n=54$), y de abril a agosto es -56 mm eq.a., ($s=62$ mm eq.a., $n=50$). En los promedios anteriores se excluyen los años 1996-1997 y 1997-1998.

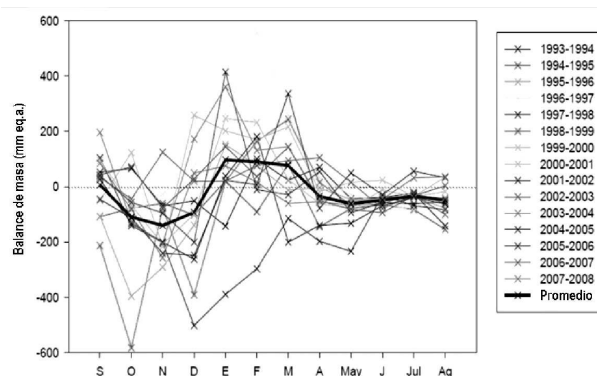


FIG. 8.— Balance de masa hidrológico para el periodo de estudio (1993-2008). En línea negra se representa el promedio de todo el periodo de estudio (1993-2008). El promedio de septiembre a diciembre es -81 mm eq.a. ($s=158$ mm eq.a., $n=52$), de enero a marzo es 94 mm eq.a. ($s=130$ mm eq.a., $n=54$), y de abril a agosto es -40 mm eq.a., ($s=53$ mm eq.a., $n=50$). En los promedios anteriores se excluyen los años 1996-1997 y 1997-1998.

masa más bajos (promedio=-109 mm eq.a., $s=108$ mm eq.a., $n=52$) debido a un incremento progresivo en la radiación solar y a una disminución del albedo en la superficie. De enero a marzo los balances de masa son casi nulos (promedio=3 mm eq.a., $s=50$ mm eq.a., $n=54$) debido a un aumento progresivo del albedo; sin embargo, la eventual ablación evidenciada está relacionada a la emisión de ondas largas por las nubes convectivas que se forman en estos meses. Finalmente, entre abril y agosto la débil ablación (promedio=-56 mm eq.a., $s=62$ mm eq.a., $n=50$) es originada por la emisión de ondas largas por la atmósfera desprovista de nubes a estas altitudes.

La figura 8, que muestra la variabilidad mensual del balance de masa de todo el glaciar para el periodo estudiado, nos permite contrastar tal variabilidad con los correspondientes en parte baja del glaciar (figura 7). Así, destacamos tres aspectos importantes: el primero es que en promedio, los

meses de octubre-diciembre son los meses de mayor ablación del glaciar ($B_n \sim B_h = -150$ mm eq.a.), y los meses de enero-marzo son los meses de acumulación del glaciar ($B_h = 90$ mm eq.a.). El segundo aspecto es la tendencia a la simultaneidad de los procesos de ablación y acumulación que es concordante con los trabajos anteriores que indican que el balance de masa anual de los glaciares dependen del inicio y de la distribución del periodo de precipitación. Como último aspecto, reafirmamos el rol de la parte baja del glaciar (4900-5300 msnm) en el proceso de ablación. Observese que los valores mensuales de ablación de esta parte del glaciar (figura 7) son semejantes a los valores de la integridad del glaciar (figura 8).

5. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

En el cálculo del balance de masa, se presentaron los resultados de dos métodos independientes uno del otro. La comparación de ambos métodos es favorable; sin embargo, hay importantes fuentes de errores que deberán ser tratados en trabajos posteriores como ser las interpolaciones lineales entre el rango altitudinal 5300-5700 msnm, la corrección en la medición de la precipitación (40%) y la variabilidad estacional del coeficiente de escurrimiento (*ce*).

En el periodo de 15 años estudiados, se observó una tendencia al registro de balances de masa nega-

tivos (disminución acumulada de 6m eq.a.). Estos 15 años están comprendidos en el periodo de años 1980-2005 que se caracteriza por una mayor frecuencia de eventos EL NIÑO y que está asociado a la oscilación decadal del pacífico (PDO, por sus siglas en inglés) (Francou & Vincent 2007). Particularmente los años 1982-1983 y 1997-1998 corresponden a los años con el mayor índice del mencionado evento.

En lo que corresponde al balance de masa anual, se mostró la importancia de la zona de ablación y de la zona entre 4900 y 5300 msnm en años con balance de masa deficitario. Por ejemplo el año 1997-1998, estas zonas del glaciar contribuyen con alrededor del 90 % al balance de masa anual (año de mayor ablación de nuestra serie).

En cuanto al balance de masa mensual, se constató que los meses de septiembre a marzo son aquellos donde la variabilidad del balance de masa es significativa con respecto al anual. (91% de varianza respecto al anual). Los meses de septiembre a diciembre se registran los valores de balances de masa más bajos debido a un incremento en la radiación solar y a una disminución del albedo en la superficie; de enero a marzo los balances de masa son casi nulos debido a un aumento progresivo del albedo. Finalmente, Entre abril y agosto la débil ablación es originada por la emisión de ondas largas por la atmósfera desprovista de nubes a estas altitudes.

REFERENCIAS

- Aceituno P. & Montecinos A. (1993), *Circulation anomalies associated with dry and wet periods in the South American Altiplano* (Proc. Fourth Int. Conf. on Southern Hemisphere Meteorology, Hobart, Australia. Amer. Meteor. Soc), 330-331
- Coudrain A., Francou B. & Kundzewicz Z. W. (2005), *Glacier shrinkage in the Andes and consequences for water resources*, Vol. 50 (Journal of Hydrological Sciences), 925-932
- Francou B. & Vincent C. (2007), *Les glaciers l'preuve du climat* (IRD)
- Francou B., Vuille M., Wagnon P., Mendoza J. & Sicart J. E. (2003), *Tropical climate change recorded by a glacier in the central Andes during the last decades of the twentieth century: Chacaltaya, Bolivia*, 16S (Journal of Geophysical Research)
- Francou B., Wagnon P., Sicart J. E., Maisincho L., Ginot P., Chazarin J. P., Favier V. & Ribstein P. (2007), *Mass balance versus climate: accumulation and ablation. Is it the end of snowy heights? Glaciers and Climate change in the Andean Community* (General Secretariat of the Andean Community, IRD, UNEP), 103 pp
- Kaser G. (2002), *Tropical glaciers* (Camridge University Press)
- Larson L. W. & Peck E. L. (1974), *Accuracy of precipitation measurement for hydrological modelling*, Vol. 10 (Water Resources Research), 857-863
- Paterson W. S. D. (1994), *The physics of glaciers* (Elsevier Science Ltd, Oxford.), 31p
- Rabatel A. (2005), *Chronologie et interprétation paléoclimatique des fluctuations des glaciers dans les Andes de Bolivie depuis le maximum du Petit Age Glaciaire* (Ph.D. thesis, Univ. J. Fourier (Grenoble 1)), 192p
- Rabatel A. et al. (2012), *Current state of glaciers in the tropical Andes. A multi secular perspective on glacier evolution and climate change* (in preparation)
- Ribstein P., Tiriau E., Francou B. & Saravia R. (1995), *Tropical climate and glacier hydrology: a case study in Bolivia*, Vol. 165 (Journal of Hydrology), 221-234
- Sicart J. E. (2002), *Contribution l'étude des flux d'énergie, du bilan de masse et du débit de fonte d'un glacier tropical: Le Zongo, Bolivie* (Ph.D. thesis, Univ. Paris VI), 333 p
- Sicart J. E., Hock R., Ribstein P., Litt M. & Ramirez E. (2003), *Analysis of seasonal variations in mass balance and meltwater discharge of the tropical Zongo Glacier by application of a distributed energy balance model* (J. of Geophys. Res.)
- (2011), *Analysis of seasonal variations in mass balance and meltwater discharge of the tropical Zongo Glacier by application of a distributed energy balance model* (J. of Geophys. Res.)
- Sicart J. E., Ribstein P., Francou B., Pouyaud B. & Condom T. (2007), *Hydrological and Glaciological Mass Balances of a tropical glacier: Zongo, Bolivia*, Vol. 59 (Global Planet change), 1-4
- Soruco A., Vincent C., Francou B., Ribstein P., Berger T., Sicart J. E., Wagnon P., Arnaud Y., Favier V. & Lejeune Y. (2009), *Mass balance of Zongo glacier, Bolivia, between 1956 and 2006, using glaciological, hydrological and geodetic methods*, Vol. 50 (Annals of Glaciology), 1-8
- Troll C. (1941), *studien zur vergleichenden Geographie der Hochgebirge der Erde* (Bonner Mitteilungen, Zurich)
- Vuille M., Bradley R. S., Werner M. & Keimig F. (2003), *20th century climate change in the tropical Andes: observations and model results*
- Wagnon P., Ribstein P., Francou B. & Sicart J. E. (2001), *Anomalous heat and mass budget of Zongo Glacier, Bolivia, during the 1997-98 El Nino year*, Vol. 47 (Journal of Glaciology), 21-28
- WGMS. (2007), *Submission of Glacier Fluctuation Data to the World Glacier Monitoring Service General Guidelines and Attribute Descriptions* (World Glacier Monitoring Service, Zurich)
- (2009), *Glacier mass balance bulletin* (Bulletin N10 (2006-2007))