

## Sección 3

### El retroceso glaciar en un contexto de cambio climático regional

Esta sección<sup>8</sup> se inicia con una revisión de los principales resultados de las mediciones sobre la evolución de los glaciares tropicales. Luego, se analizan los datos de balance de masa en Bolivia y Ecuador desde principios de los noventa, para lo cual se ha utilizado información medida en toda la superficie del glaciar para resaltar el hecho de

que los glaciares ubicados en los Andes Centrales responden simultáneamente a las fluctuaciones del clima.

También se analiza la relación entre los eventos ENSO y las fluctuaciones de balance de masa, y finalmente se presentan las conclusiones de la sección.

#### 3.1 Una clara aceleración del retroceso glaciar desde los años setenta.

En todos los glaciares en los que el balance de masa ha sido estimado, se ha observado que el tiempo de respuesta del frente ante variaciones climáticas es relativamente corto (por lo general un año). Este fenómeno se debe a que en glaciares de pequeño tamaño (como los tropicales) las tasas de ablación se incrementan conforme se avanza hacia la parte baja, a tasas generalmente mayores que en glaciares de mediana altitud (Kaser y Osmaston, 2002).

Es importante resaltar que todos los glaciares observados en los Andes Centrales han acelerado su retroceso durante los últimos 25 años. La Figura 3.1 (en la siguiente página) presenta la evolución de diez de ellos.

A pesar que la serie de datos no es continua antes de los 1980s, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

a. Aunque la información entre 1948 y 1970 es escasa, evidencias de la Cordillera Blanca peruana (glaciares Broggi,

Uruashraju, Yanamarey) señalarían un retroceso moderado de entre 50 y 150 m por década durante este periodo.

b. Los glaciares permanecieron relativamente estables durante la década de los setentas (inclusive desde algunos años anteriores). El retroceso se limitó a alrededor de 100 m por década sobre los glaciares medidos.

c. Después de 1980 el retroceso fue rápido y generalizado, aunque ocurrió por etapas. Una primera etapa de aceleración ocurrió a principios de los ochentas, seguida de una desaceleración hasta principios de los noventas. El proceso volvió a acelerarse a mediados de esta década.

d. Después de un detenimiento entre 1999 y 2001, el retroceso se aceleró nuevamente.

En el glaciar Charquini Sur, una reconstrucción fotogramétrica de fotografías aéreas de 1940, 1956, 1963, 1974, 1983 y

<sup>8</sup> Los autores de esta sección son: Bernard Francou, Bolívar Cáceres, Eric Cadier, Alejo Cochachin, Vincent Favier, Robert Gallaire, Jesus Gomez, Luis Maisincho, Javier Mendoza, Bernard Pouyaud, Antoine Rabatel, Edson Ramirez, Jean-Emanuel Sicart, Alvaro Soruco, Thomas Berger, Marcos Villacis, Patrick Wagnon y Marco Zapata.

1997, completadas por mediciones topográficas llevadas a cabo en 2004, muestra que entre 1940 y 1974 se produjo un déficit de balance de masa moderado de 300 mm w.e. a<sup>-1</sup>. Sin embargo, éste se incrementó a 750 mm w.e. a<sup>-1</sup> en la últimas décadas (Rabatel et al. 2005), tal como se muestra en la Figura 3.2. Esta nueva observación confirma una estimación previa llevada a cabo por Ramírez et al. (2001) en el glaciar Chacaltaya, la cual muestra un aumento del déficit desde 1983, el cual se acelera después de 1991.

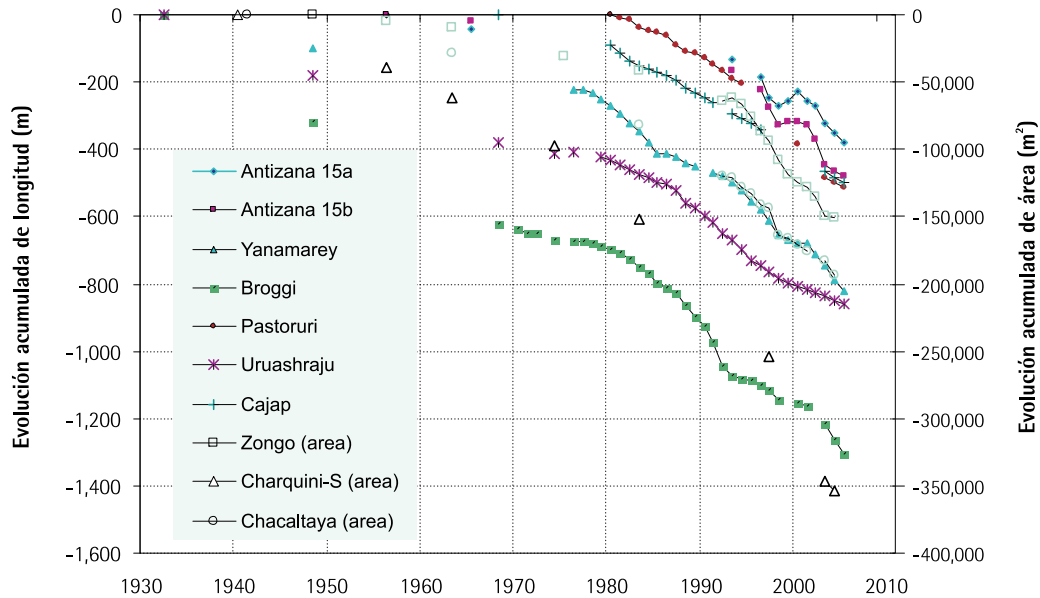
Uno podría tener la impresión de que el retroceso afecta en menor medida a las grandes masas de hielo ubicadas en nevados de gran altura. Sin embargo, un reciente análisis aerofotogramétrico llevado a cabo por Jordan et al. (2005)

en el volcán Cotopaxi (Ecuador) de 5,897 msnm y de 15 km<sup>2</sup> de superficie glaciar en 1997, muestra que su masa de hielo se redujo 30% entre 1956-1976 y 1976-1997 (Figura 3.3). Según una estimación más reciente utilizando una foto de 2006, y aplicando el mismo método, se encuentra una reducción sobre los treinta últimos años (1976-2006) de 38,5% (Cadier y 12 otros, 2007).

Un retroceso de la misma magnitud ha sido estimado por Brecher y Thompson (1993) en un glaciar saliente del nevado Quelccaya en el Perú. En el Ecuador, así como en otras zonas de los Andes Centrales, la aceleración observada desde 1975-1980 evidencia un cambio climático ocurrido a escala regional.

Figura 3.1

- Evolución de la longitud (izquierda) y área (derecha) de diez glaciares en los Andes Centrales<sup>9</sup> -

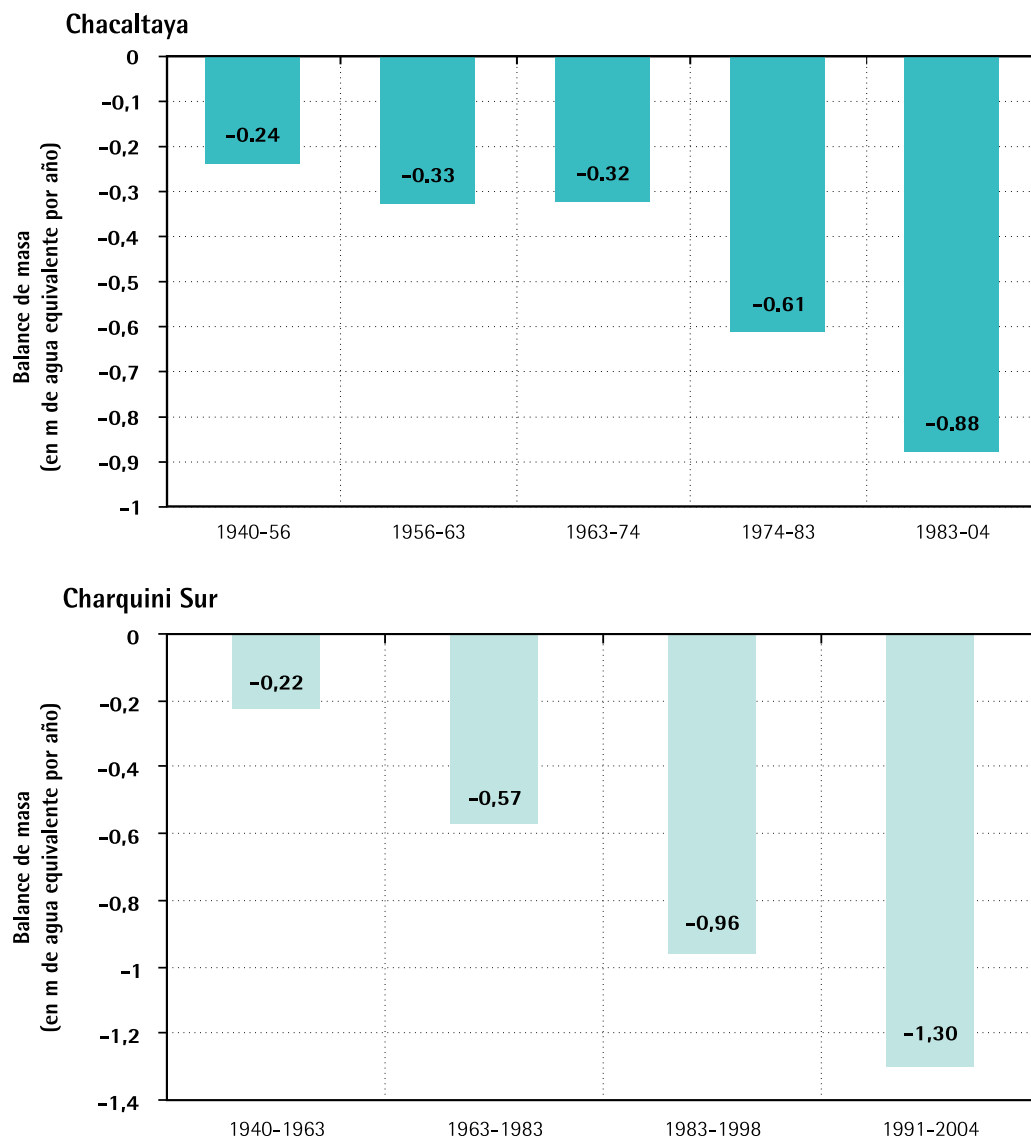


Fuente: IRD, IHH, SENAMHI-Bolivia, INRENA, INAMHI, EMAAP-Q

<sup>9</sup> Información de mediciones directas y reconstrucciones aerofotogramétricas. Solo la evolución del área de los glaciares bolivianos (Zongo, Chacaltaya y Charquini Sur) se presenta en términos de cambios de área.

Figura 3.2

- Estimación del balance de masa promedio de los glaciares Charquini Sur (gráfico superior) y Chacaltaya (gráfico inferior)<sup>10</sup> -

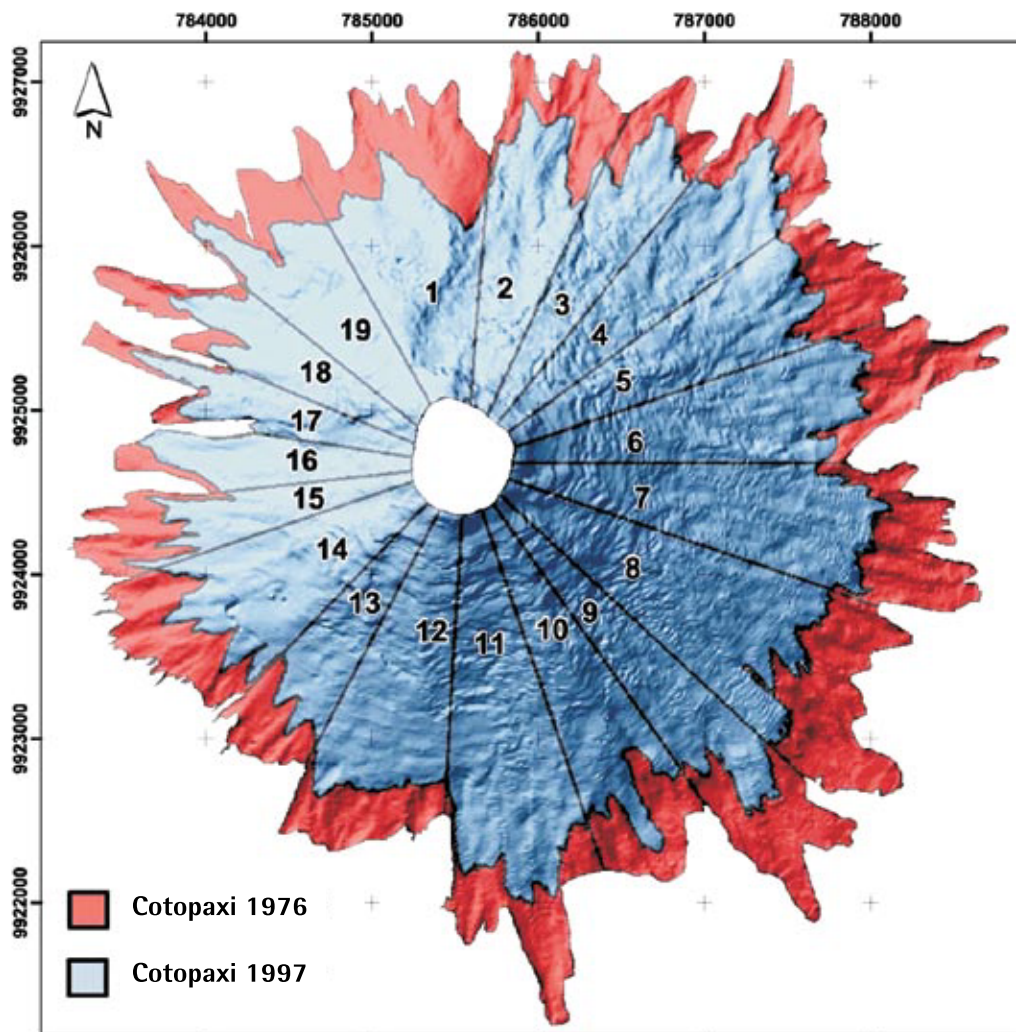


Fuente: Ramirez et al., 2001; Rabatel et al., 2005b.

<sup>10</sup> Los periodos anteriores a 1991 (Chacaltaya) y 1997 (Charquini Sur) han sido analizados usando aerofotogrametría. Nótese que los dos últimos periodos del Chacaltaya se sobrepone. Promedios de los balances por periodos en m de agua equivalente/año.

Figura 3.3

- Retroceso de los glaciares del Cotopaxi (Ecuador) durante el periodo 1976-1997<sup>11</sup> -



Fuente: Jordan et al., 2005.

<sup>11</sup> Los glaciares están numerados en el sentido de las agujas del reloj empezando por el norte. El color rojo representa el retroceso entre 1976 y 1997. El retroceso entre 1956 y 1976 fue insignificante.

## 3.2 Variabilidad del balance de masa desde principios de los 1990s

### 3.2.1 Glaciares "pequeños" y "grandes"

Existe una fuerte relación entre el balance de masa y el tamaño de un glaciar. Como se puede observar en la Figura 3.4 (superior), los glaciares Zongo y Antizana 15α perdieron entre 400 y 600 mm w.e. a<sup>-1</sup> durante los periodos analizados<sup>12</sup>, mientras que el déficit del Chacaltaya alcanzó 1,300 mm w.e. a<sup>-1</sup>; una tasa coherente con la del glaciar Charquini Sur.

Es importante notar que el análisis de tendencias esconde una fuerte variabilidad interanual. En efecto, fluctuaciones entre balances positivos y déficit de hasta 2,000 mm w.e a<sup>-1</sup> fueron observados en los glaciares Zongo y Antizana 15α durante el mismo periodo de análisis (Figura 3.4 inferior).

Glaciares como el Zongo y el Antizana, los cuales mantienen zonas de acumulación considerables a grandes alturas (mayores a 5,500 msnm), pueden recuperar masa ciertos años gracias a ingresos más importantes que los déficit.

En cambio, el balance de masa de los glaciares Chacaltaya y el Charquini Sur, ambos de menos de 0.5 km<sup>2</sup>, ha sido constantemente negativo. Inclusive el glaciar Charquini Sur, el cual fue seleccionado como una fuente de información alternativa al Chacaltaya, experimentó un déficit de masa de la misma magnitud que este glaciar durante los primeros tres años de mediciones.

De estas observaciones se puede concluir que los pequeños glaciares que no cuentan con una zona permanente de acumulación se encuentran fuertemente desbalanceados. En efecto, un déficit de alrededor de 1,000 mm w.e. a<sup>-1</sup> podrían llevar a su completa extinción en una o dos décadas. Asimismo, si se toma en cuenta el rezago de varios meses que ocurre por la distinta periodicidad de los años hidrológicos, se puede concluir que glaciares como el Zongo y el Antizana 15α, distantes 16 grados de latitud, han experimentado una evolución similar. Sin embargo, esta conclusión será más definitiva cuando la muestra de glaciares que proporcionan datos de balance de masa haya sido extendida a varios otros macizos

### 3.2.2 Paralelismo en las tasas de ablación y estacionalidad comparada en Bolivia y Ecuador.

El balance de masa en la zona de ablación refleja la evolución del balance de energía en la superficie de un glaciar. En la Figura 3.5 (página 49) se presenta este indicador medido en distintas áreas de la zona de ablación de los glaciares Zongo, Chacaltaya, Charquini Sur (Bolivia) y Antizana 15α (Ecuador).

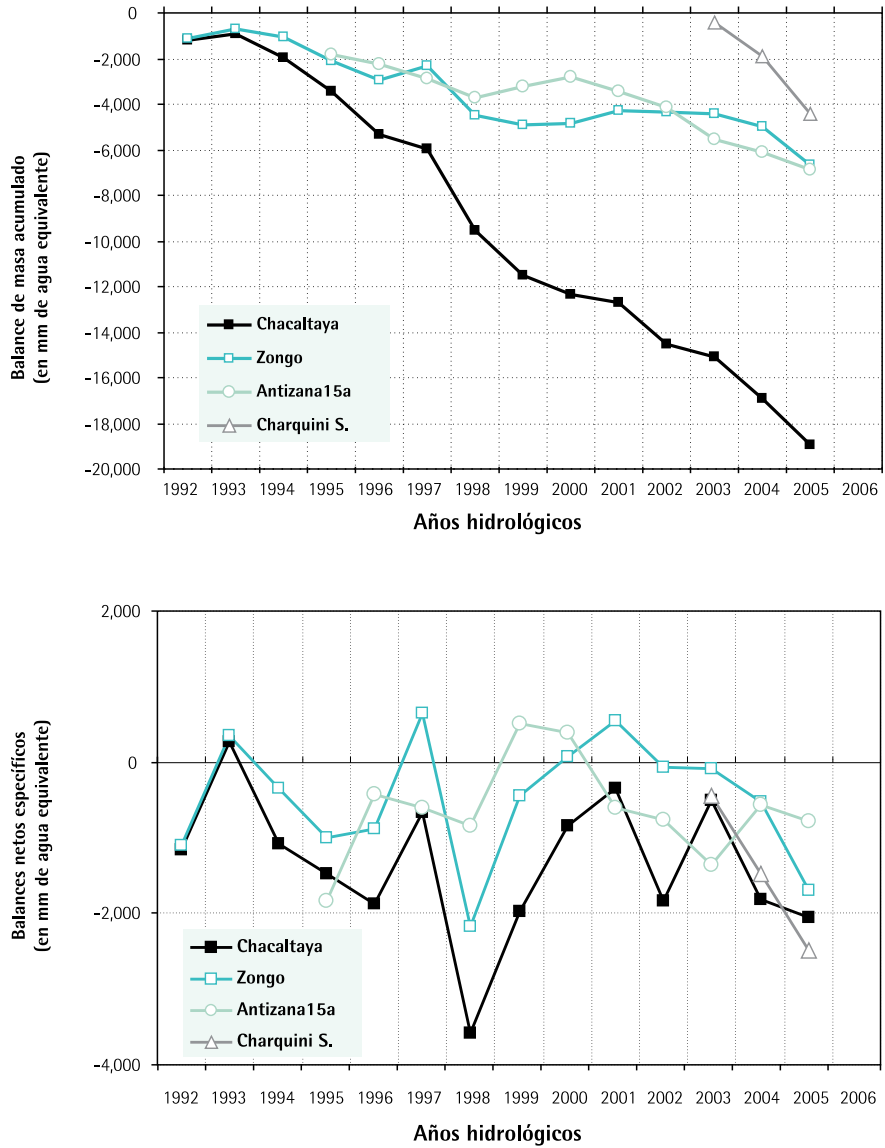
Si bien la comparación de las tasas de ablación no proporciona mucha información debido a que éstas dependen de las

condiciones particulares de cada glaciar, es posible examinar la simultaneidad en su evolución. En los cuatro glaciares mencionados, las tasas de ablación fueron mayores en los años 1995, 1997 y 1998; y fueron menores en 1993, 1996, 1999 y 2000. Asimismo, se puede observar que la evolución del Antizana estuvo adelantada por lo menos seis meses a la de los glaciares bolivianos. Se puede suponer que este fenómeno se debe al débil efecto de la estacionalidad en zonas cercanas a la línea ecuatorial. En efecto, cambios climáticos ocurridos en cualquier momento del año se reflejarían inmediatamente en la evolución del glaciar, mientras que en Bolivia este ocurriría sólo en el verano (octubre-marzo).

<sup>12</sup> Nótese que los años hidrológicos son distintos para Bolivia y Ecuador: Para los glaciares Zongo y Chacaltaya, se considera 1992 al periodo Septiembre 1991-Agosto 1992; mientras que para el Antizana 15α es enero-diciembre 1992.

**Figura 3.4**

- Evolución anual acumulada (arriba) y anual (abajo) de los balances netos específicos de los glaciares bolivianos Chacaltaya, Zongo, Antizana 15α y Charquini S -



Fuente: IRD, IHH, SENAMHI-Bolivia, INAMHI,EMAAP-Q

La Figura 3.6 (página siguiente) muestra la estacionalidad de la ablación ocurrida en los glaciares Chacaltaya y Antizana 15α entre 1991 y 2004

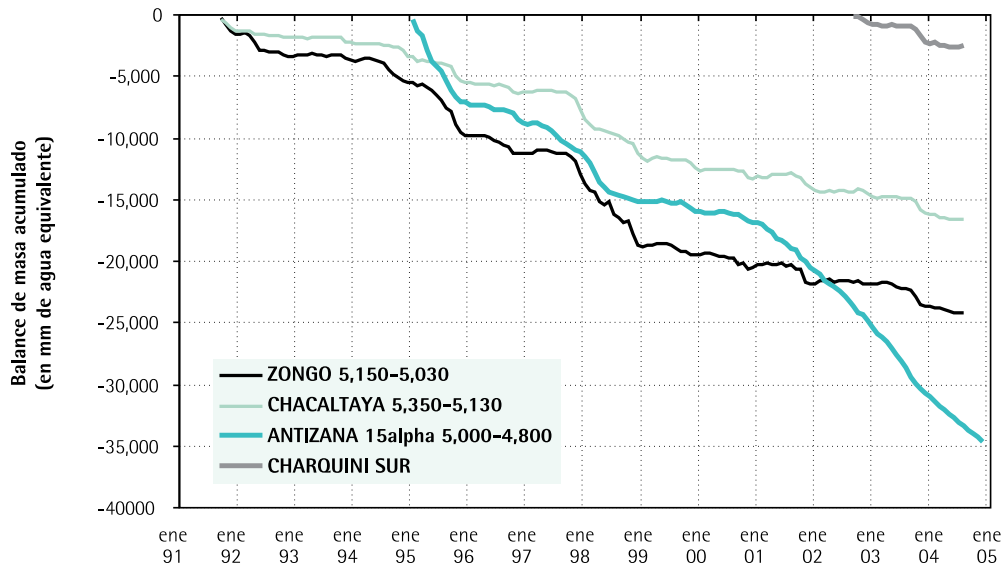
En Bolivia, la ablación anual se concentra entre los meses de octubre y abril. Estos meses representan también el 98% de la variabilidad interanual del balance de masa, de la cual el 78% se produce entre diciembre y febrero (Franco et al., 2003) (Figura 3.6, gráfico superior). Esta fuerte estacionalidad y su variabilidad de un año al otro son la consecuencia de la variabilidad del balance de

energía sobre la superficie del glaciar (ver sección 5, página 65).

En el Ecuador, aunque la ablación es intensa durante todo el año, su variabilidad máxima ocurre en los periodos abril-mayo y agosto-septiembre; es decir, en fechas cercanas a los equinoccios (Figura 3.6, inferior). A nivel de procesos, las diferencias entre el trópico externo (Bolivia, 16°S) y trópico interno (Ecuador, 0°28S) no solamente se deben a la estacionalidad de la ablación sino también a los procesos responsables de su variabilidad interanual.

**Figura 3.5**

- Balance de masa acumulado en distintas áreas de la zona de ablación de cuatro glaciares<sup>13</sup> -

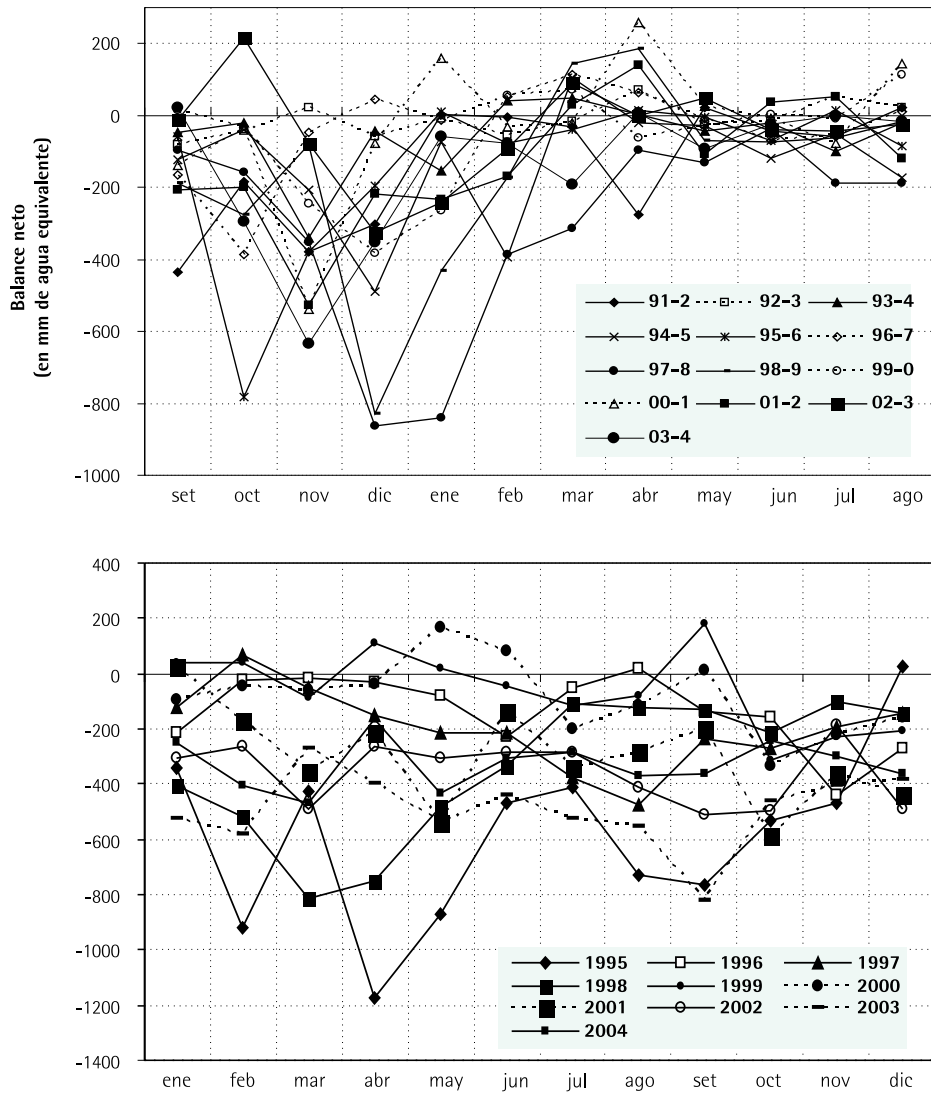


Fuente: IRD, IHH, SEMAMHI-Bolivia, INAMHI, EMAAP-Q.

<sup>13</sup> Nótese que las altitudes no son las mismas que las de la Figura 3.4. La Figura 3.5 incluye la superficie completa de los glaciares Chacaltaya y Charquini Sur, la mayor parte de la zona inferior del Antizana 15α y una parte importante de la zona de ablación superior del glaciar Zongo. La zona frontal de este glaciar no ha sido incluida debido a que su elevada pendiente altera la medida. Los años señalados empiezan en enero.

Figura 3.6

- Balance de masa en las zonas de ablación de los glaciares Chacaltaya (figura superior) y Antizana 15α (figura inferior)<sup>14</sup> -



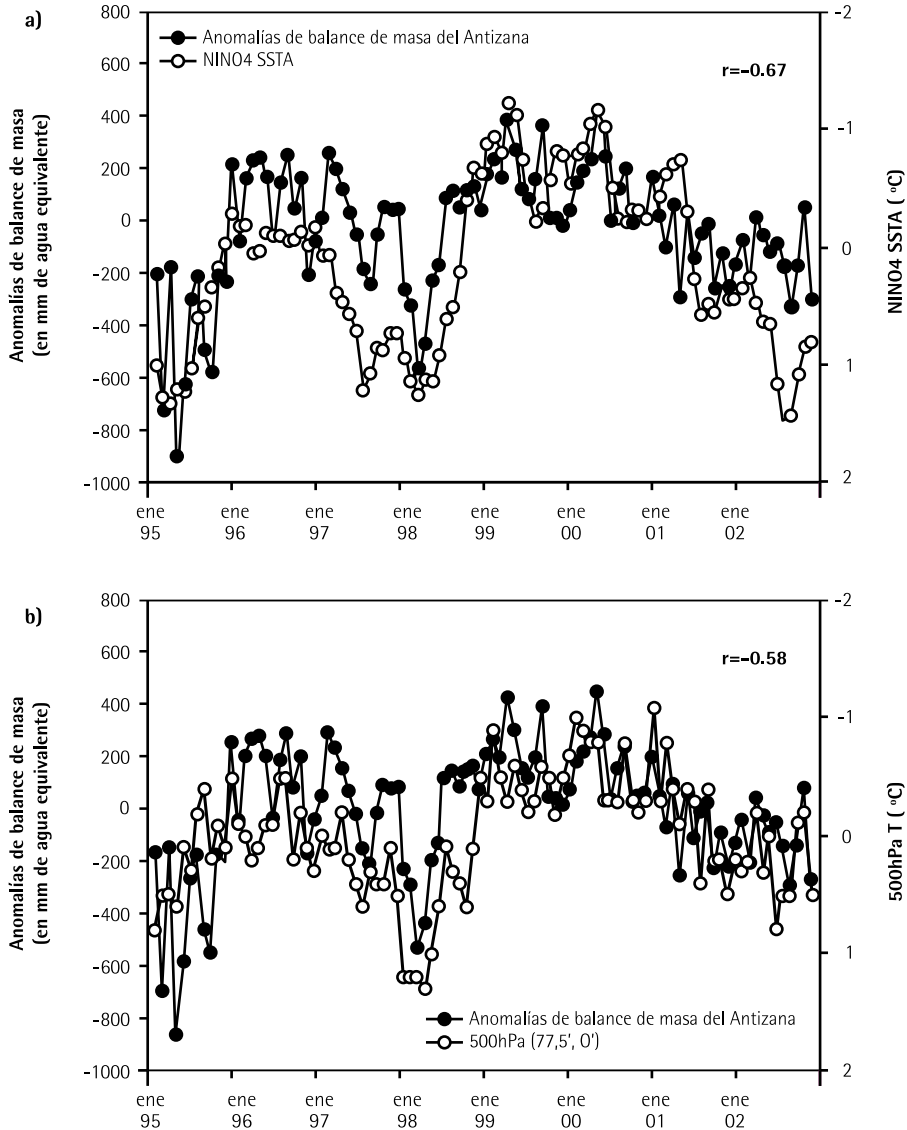
Fuente: Francou et al., 2003; 2004

<sup>19</sup> Valores en milímetros de agua equivalente. Los datos del glaciar Chacaltaya son de septiembre a agosto, mientras que los del Antizana 15α de enero a diciembre.



Figura 3.7

- Anomalías entre el balance de masa en la parte baja del Antizana 15 y la temperatura superficial del mar en el sector de Niño-4<sup>15</sup> -



Fuente: Francou et al., 2004

<sup>15</sup> **Figura superior:** Anomalías respecto con el promedio entre el balance de masa de la parte baja del glaciar Antizana 15a y la temperatura superficial del mar en el sector de Niño-4. La barras muestran que la correlación entre las dos variables es óptima cuando los datos del glaciar son comparados con tres meses de retardo respecto a la anomalía de la temperatura del Pacífico en Niño-4 (Niño4SSTa)

**Figura inferior:** La misma anomalía del balance de masa respecto la temperatura de la atmósfera a los 500 hPa (5000 msnm, es decir, la altura de la zona de ablación del Antizana). Los datos de temperatura en el eje Y' son en orden inverso. Valores del balance del glaciar en milímetros de agua equivalente y de las temperaturas en grados Celsius.

**3.2.3 Balance de masa y temperatura superficial del Pacífico Ecuatorial: influencia del ENSO**

Antes de describir esos procesos, se puede notar que son las fases opuestas de los eventos ENSO (fase cálida y fase fría) las que explican las situaciones más contrastantes observadas sobre los glaciares de los Andes Centrales, tanto en Bolivia como en el Ecuador.

En el Antizana 15α, el balance de masa está correlacionado (negativamente) con la temperatura superficial del mar en el sector Niño-4 del Pacífico ecuatorial<sup>16</sup>. La Figura 3.7 muestra la estrecha correlación entre (i), las tasas de ablación en la parte baja del glaciar (menos de 5,000 msnm) y un indicador del ENSO en el Pacífico central; y (ii), entre las mismas tasas de ablación y la temperatura de la atmósfera (reanalizada) en la altura del glaciar.

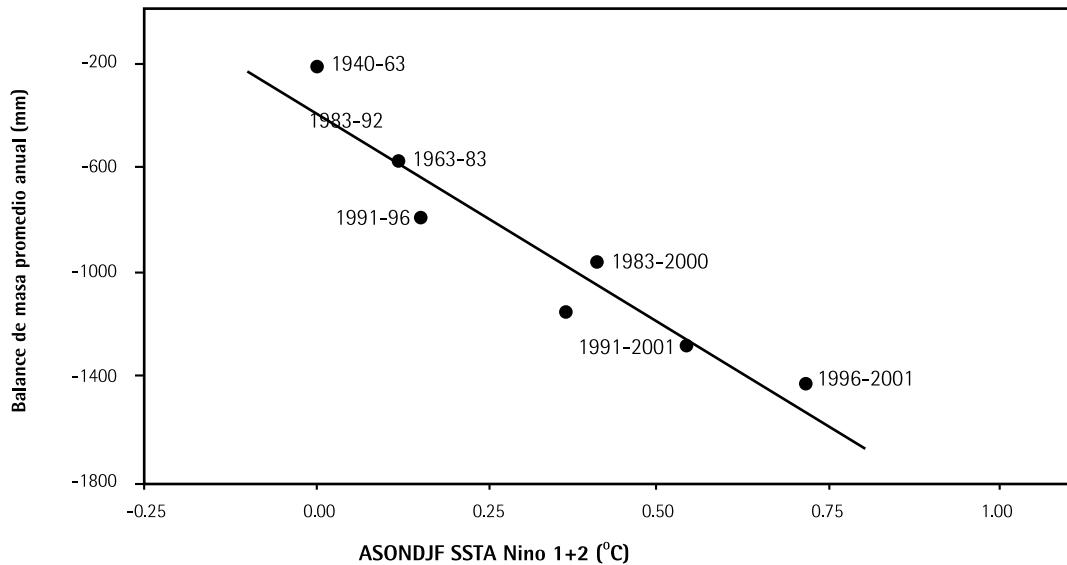
En Bolivia, se observa una correlación entre el balance de masa del glaciar Chacaltaya y la temperatura superficial del mar, pero en el sector Niño 1+2 (sector cercano a la costa sudamericana) durante los meses de verano, con dos meses de desfase. Esta relación se puede apreciar en la Figura 3.8 (abajo).

En esa línea, Arnaud et al. (2001) analizaron la influencia del ENSO sobre la precipitación y la temperatura en la región del volcán Sajama, ubicado en la parte occidental del Altiplano boliviano, a unos 100 km de la costa del Pacífico.

Los autores examinaron la variación de altura de una porción de la línea de nieve entre 1963 y 1998. Los resultados muestran una elevación general de la línea de nieve entre 1963 y 1998, con un incremento sostenido entre 1984 y 1990, tal como se muestra en la Figura 3.9 (página siguiente)

**Figura 3.8**

- Relación entre el balance de masa del glaciar Chacaltaya y la temperatura superficial del mar en el sector Niño1+2<sup>17</sup> -



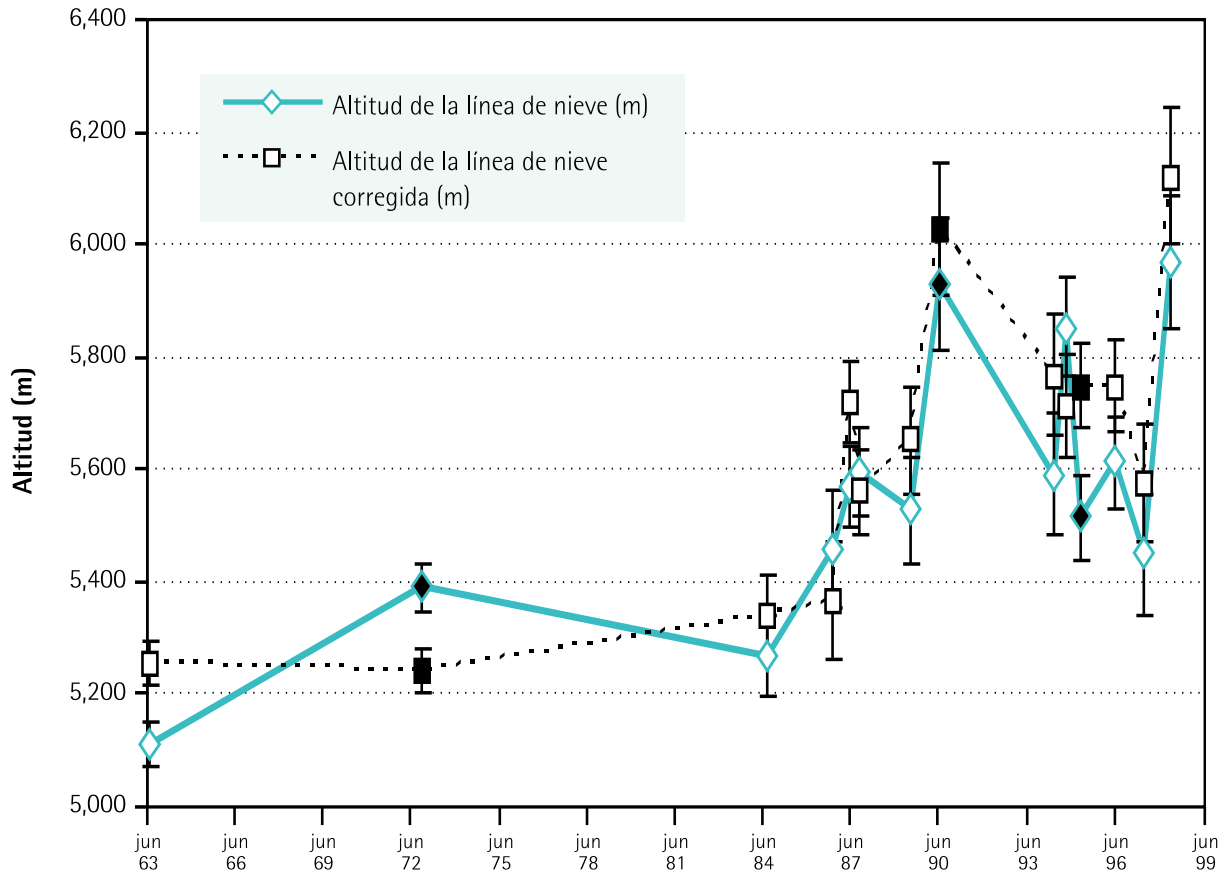
Fuente: Francou et al., 2003

<sup>16</sup> El Pacífico Ecuatorial se divide en cuatro sectores "El Niño", que van desde el sector denominado Niño-1 ubicada en la parte este en la región de la costa norte del Perú y de la costa sur del Ecuador hasta el sector Niño-4, ubicado en la parte centro oeste (5°N-5°S y 160°E-150°W).

<sup>17</sup> Promedios sub- y multi-decenales de los balances de masa anuales. Temperatura superficial del mar (SSTA) entre agosto y febrero

Figura 3.9

- Evolución de línea de nieve del volcán Sajama -



Fuente: Arnaud et al. (2001)

<sup>23</sup> Foto tomada en junio de 1963. Escala aproximada: 1:45,000. Los puntos negros indican el área de estudio.

### 3.3 ¿Es excepcional el retroceso de los glaciares andinos?

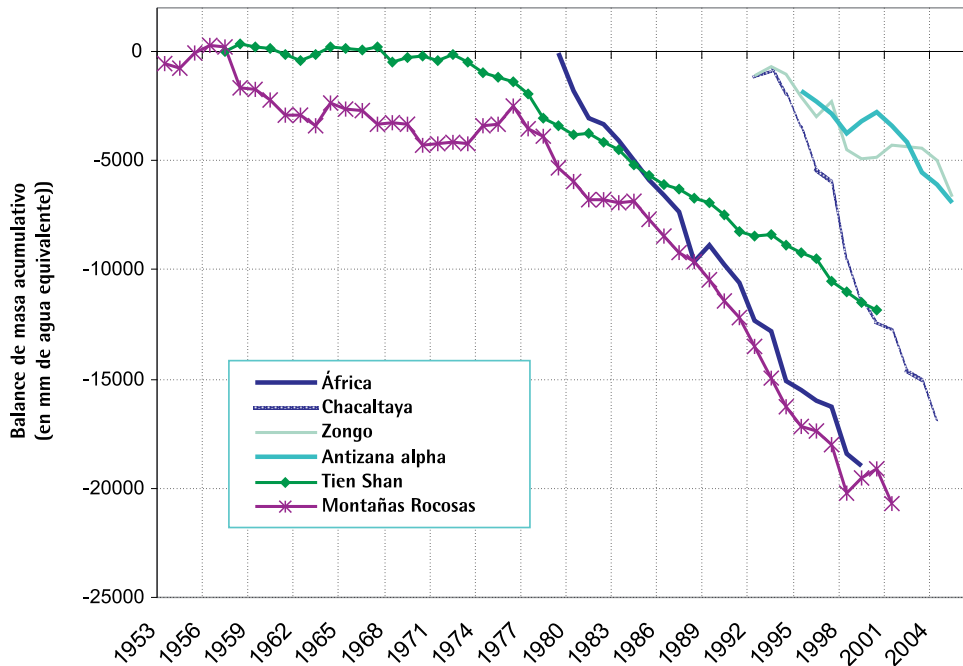
En el estudio reciente de Francou y Vincent (2007), se compiló información sobre 75 glaciares de montaña ubicados en distintos macizos del mundo. Esta información ofrece la posibilidad de comparar las tasas de retroceso de los glaciares del trópico con aquellas de glaciares ubicados en otras latitudes.

Como se puede ver en la Figura 3.10, la tasa de recesión determinada a partir de los balances de masa acumulados

en los Andes Centrales (600–400 mm w.e. a<sup>-1</sup>), no es excepcional para glaciares que conservan una extensa zona de acumulación, si se le compara con los promedios calculados en los macizos de las montañas rocosas (América del Norte) o Tien-Shan (Asia Central). Los “pequeños” glaciares ubicados en las regiones tropicales, como en Kenya y Bolivia sufren pérdidas de la misma magnitud, en alrededor de 1,000 mm w.e a<sup>-1</sup>.

Figura 3.10

- Evolución acumulada del balance de masa de diversos glaciares del mundo<sup>18</sup> -



Fuente: Arnaud et al. (2001)

<sup>18</sup> Referencias de los glaciares considerados en Francou y Vincent, 2007: El gráfico se refiere a tres glaciares de los Andes Centrales (Chacaltaya, Antizana 15α y el Zongo), al glaciar Lewis (Kenya), a los ubicados en las Rocky Mountains (Canadá-Estados Unidos) y a los glaciares Tien Shan, en el Asia Central.

### 3.4 Conclusiones sobre el retroceso glaciar en relación al cambio climático regional

Más de una década de observación de glaciares por parte del IRD y sus contrapartes andinas permite extraer las siguientes conclusiones:

- a. El retroceso de los glaciares ubicados en los Andes Tropicales se ha intensificado desde fines de los 1970s.
- b. La magnitud del retroceso depende del tamaño del glaciar. Aquellos considerados "grandes" han perdido entre 400 y 600 mm de agua equivalente por año desde el inicio de las observaciones (1991-1995), mientras que los "pequeños" han disminuido a tasas mayores (entre 1,000 y 1,300 mm de equivalente agua por año). Dado que la altura de la línea de equilibrio (ELA) se encuentra generalmente por encima de los 5,000 msnm, glaciares que no posean grandes áreas por encima de este nivel se encuentran fuertemente desbalanceados y en peligro de extinción en un futuro cercano. Este es el caso del Chacaltaya.
- c. Mediciones del balance de masa han revelado la existencia de una gran variabilidad al interior del patrón estacional, la cual se concentra en ciertos meses. Esto sugiere que la relación entre clima y balance de masa se concentra en periodos clave durante los cuales el flujo radiativo entrante por la alta atmósfera es máximo y las precipitaciones son fuertes pero variables.
- d. La contribución de los eventos cálidos del Pacífico (Fenómenos El Niño) a la recesión de los glaciares tropicales en los Andes ha sido determinante. Algunos eventos fríos pueden restaurar parte de la masa de hielo, pero sólo en glaciares con grandes áreas de acumulación ubicadas por encima de los 5,400 msnm. Los glaciares pequeños no recuperan masa,

sólo reducen su déficit durante estos eventos fríos.

- e. Debido a diferencias importantes en la estacionalidad del clima en el trópico interior (Ecuador) y exterior (Perú y Bolivia), los procesos activos en la superficie del glaciar también deberían ser diferentes. Esta cuestión será analizada con mayor detalle en la sección 5.
- f. La tasa de retroceso glaciar en los Andes Centrales es fuerte pero no parece ser excepcionalmente alta en comparación con el resto del mundo. Otros glaciares tropicales se están reduciendo a tasas similares, como el Lewis en Kenya, pero las observaciones continuas son demasiado escasas para ser tajantes en esta afirmación. Aunque no se puede generalizar, se han observado tasas de retroceso similares en regiones extra-tropicales.

Las observaciones realizadas demuestran que el "Pacific Shift" (cambio de fase del Pacífico) ha jugado un papel fundamental en la aceleración del retroceso de los glaciares andinos desde 1976. Por esta razón, es necesario continuar analizando el efecto que tiene el comportamiento del Océano Pacífico en los glaciares de la región. Una cuestión importante es: ¿cómo el calentamiento del Pacífico ecuatorial se combina con la tendencia al recalentamiento global de la atmósfera que se observa a nivel del planeta desde la segunda mitad de los años setenta para explicar el rápido retroceso de los glaciares de esta parte de los Andes?

Considerando que los glaciares de esta región andina son extremadamente sensibles a la evolución de la atmósfera y al clima a escala regional, incluyendo la cuenca del Pacífico, el mantenimiento de un red de observación permanente es de un gran interés para monitorear el clima y su evolución.

## Section 3

### Glacier retreat in the context of regional climate change

This section<sup>8</sup> begins with a review of the main results of the evaluations on the evolution of tropical glaciers. Then, mass balance data from Bolivia and Ecuador since the beginning of the 1990s is analyzed using measurements on the entire surface of the glaciers to highlight the fact that glaciers

located in the Central Andes respond simultaneously to climate fluctuations. The relationship between ENSO events and mass balance fluctuation is also analyzed. Finally, the conclusions on this issue are presented.

#### 3.1 A clear acceleration of glacier retreat since the 1970s

In all the glaciers in which the mass balance has been estimated, it has been observed that the response time of the ice front in the face of climate variations is relatively short (generally one year). This phenomenon is due to the fact that in small glaciers (such as tropical glaciers), the ablation rates increase toward the lower part at rates generally greater than those in glaciers of medium altitude (Kaser and Osmaston, 2002).

It is important to emphasize that all the glaciers observed in the Central Andes have accelerated their retreat during the last 25 years. Figure 3.1 (next page) shows the evolution of 10 of them.

Despite the fact that the data series is not continuous before the 1980s, the following conclusions can be drawn:

- a. Although information between 1948 and 1970 is scarce, evidence of the Peruvian Cordillera Blanca (Broggi, Uruashraju and Yanamarey glaciers) indicates a moderate retreat of 50 to 150 m per decade.
- b. Glaciers remained relatively stable during the 1970s (and even since some years before). Retreat was limited to around 100 m per decade.
- c. After 1980, retreat was rapid and widespread, although it occurred in stages. A first stage of acceleration occurred in the early 1980s, followed by a deceleration until the beginning of the 1990s. The process accelerated again in the middle of that decade.
- d. After pausing between 1999 and 2001, the retreat accelerated again.

<sup>8</sup> The authors of this section are: Bernard Francou, Thomas Berger, Bolívar Cáceres, Eric Cadier, Alejo Cochachin, Vincent Favier, Robert Gallaire, Jesús Gómez, Luis Maisincho, Javier Mendoza, Bernard Pouyaud, Antoine Rabatel, Edson Ramírez, Jean-Emanuel Sicart, Alvaro Soruco, Marcos Villacis, Patrick Wagnon and Marco Zapata.

In the Charquini Sur glacier, a photogrammetric reconstruction of aerial photographs from 1940, 1956, 1963, 1974, 1983 and 1997, completed by topographic measurements taken in 2004, shows that between 1940 and 1974 a moderate mass balance deficit of 300 mm w.e. a<sup>-1</sup> was produced.

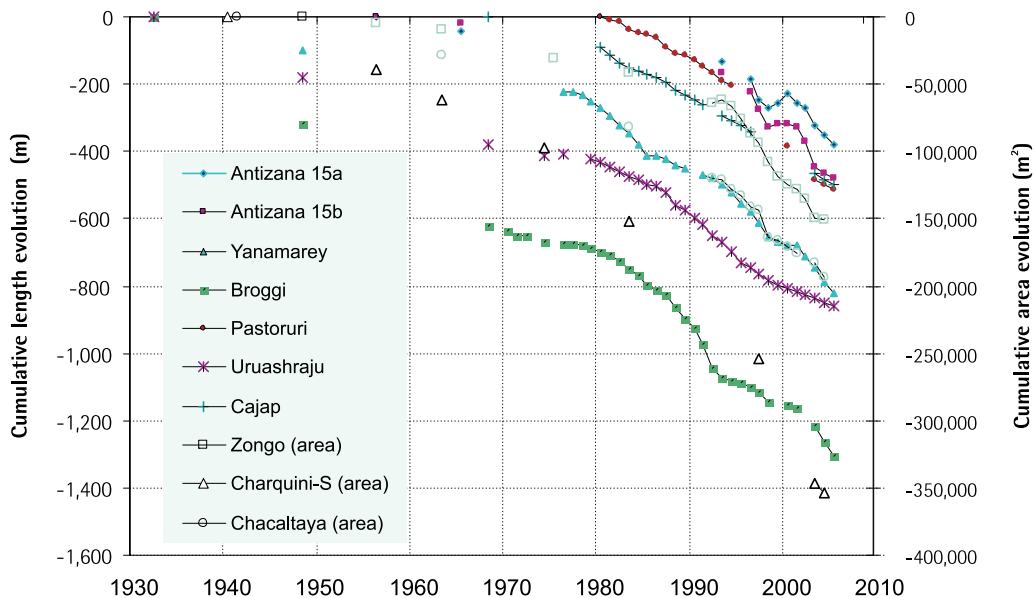
However, this increased to 750 mm w.e. a<sup>-1</sup> in the past few decades (Rabatel et al. 2005), as shown in Figure 3.2 (page 45). This new observation confirms a previous estimate made by Ramírez et al. (2001) for the Chacaltaya glacier, which shows an increase in the deficit since 1983, which accelerates after 1991.

One might get the impression that the retreat has less effect on the large ice masses located in the high-altitude ice capped mountains. However, a recent photogrammetric analysis performed by Jordan et al. (2005) on the Cotopaxi volcano (Ecuador), at 5,987 masl and 15 km<sup>2</sup> of glacier surface in 1997, shows that its ice mass was reduced by 30% between 1956-1976 and 1976-1997 (see Figure 3.3, page 46).

Asimilar retreat has been estimated by Brecher and Thompson (1993) for an outlet glacier of the ice capped Quelccaya in Peru. In Ecuador, as in other areas of the Central Andes, the acceleration observed since 1975-1980 appears to provide evidence of climate change on a regional level.

Figure 3.1

- Evolution of length (left) and area (right) of ten glaciers in the Central Andes<sup>9</sup> -

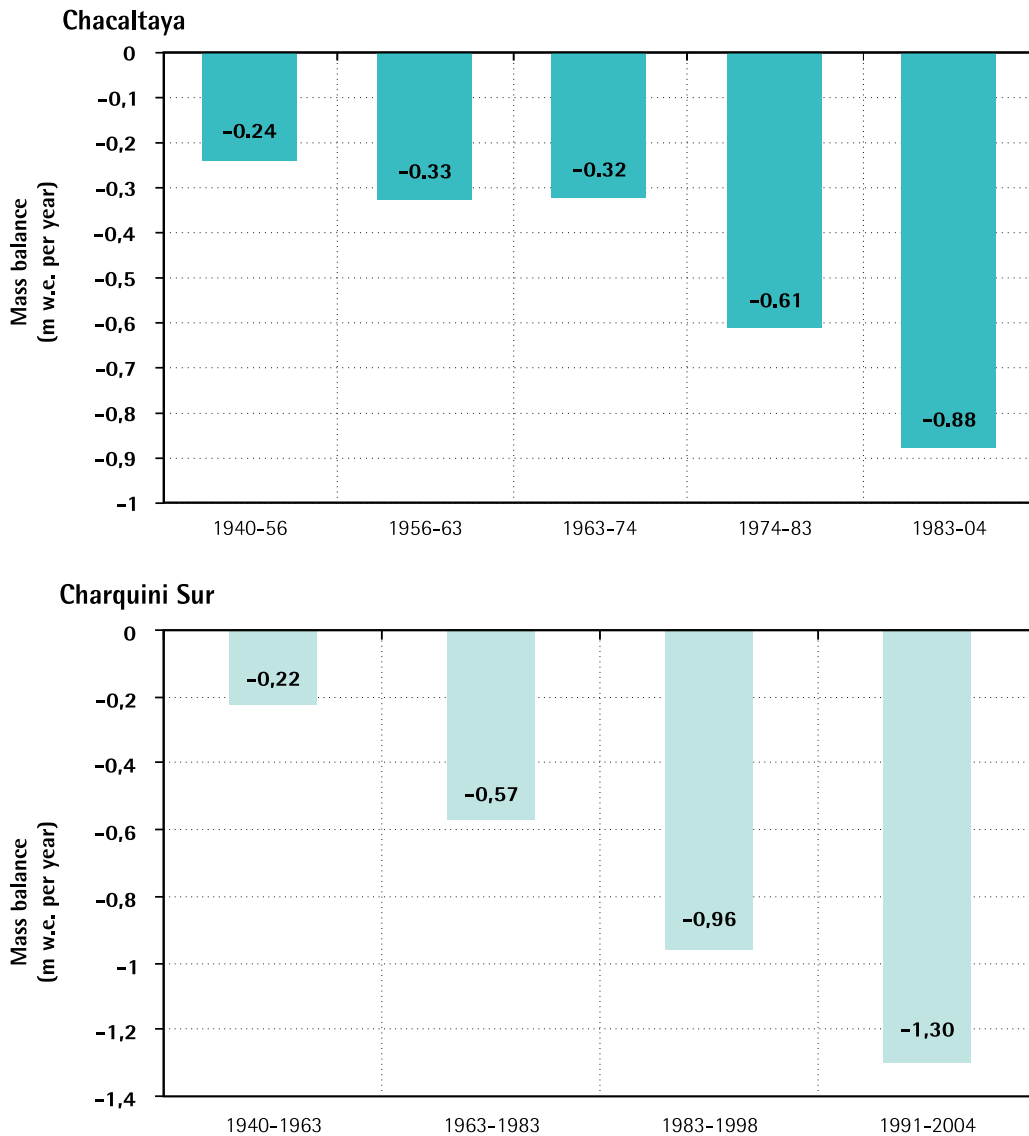


Source: IRD,IHH,SENAMHI-Bolivia,INRENA,INAMHI

<sup>9</sup> Data from direct measurements and aerophotogrammetric reconstructions. Only the evolution of the area of the Bolivian glaciers (Zongo, Chacaltaya and Charquini Sur) is shown in terms of area changes.

Figure 3.2

- Estimate of the average mass balance of the Charquini Sur and Chacaltaya glaciers in Bolivia<sup>10</sup> -



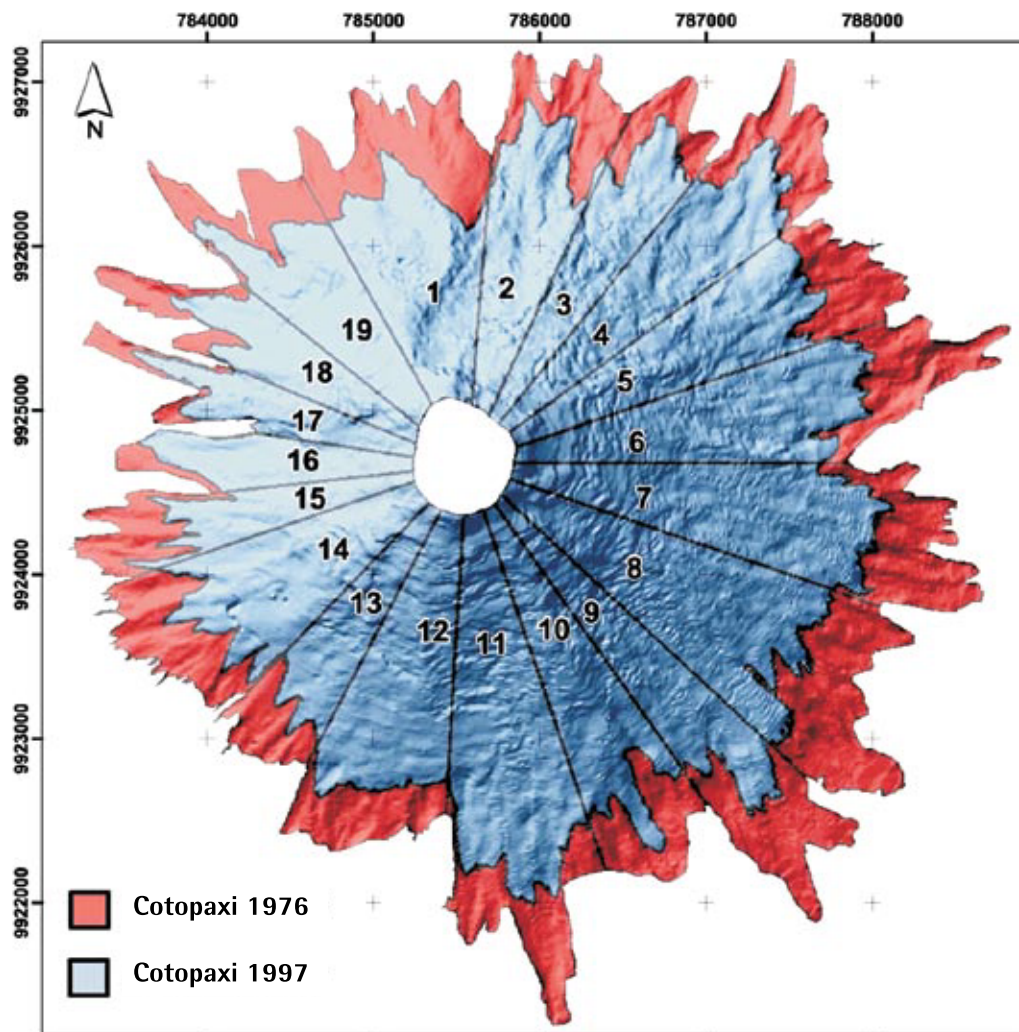
Source: Ramirez et al., 2001; Rabatel et al., 2005.

<sup>10</sup> Periods before 1991 (Chacaltaya) and 1997 (Charquini Sur) have been analyzed using aerophotogrammetry. Note that the last two periods of Chacaltaya overlap.



Figure 3.3

- Retreat of glaciers on Cotopaxi (Ecuador) in the last three decades<sup>11</sup> -



Source: Jordan et al., 2005.

<sup>11</sup> The glaciers are numbered clockwise beginning on the north side. The red represents the retreat between 1976 and 1997. The retreat between 1956 and 1976 was not significant.

## 3.2 Variability of mass balance since the beginning of the 1990s

### 3.2.1 "Small" and "large" glaciers

There is a strong relation between mass balance and the size of a glacier. As can be observed in Figure 3.4 (upper, next page), the Zongo and Antizana 15α glaciers lost 400 to 600 mm w.e. a<sup>-1</sup> during the analyzed periods<sup>12</sup>, while the deficit of Chacaltaya reached 1,300 mm w.e. a<sup>-1</sup>, a rate consistent with that of the Charquini Sur glacier.

It is important to note that the analysis of trends hides a strong interannual variability. Fluctuations between positive balances and deficits of up to 2,000 mm w.e. a<sup>-1</sup> were observed in the Zongo and Antizana 15α glaciers during the same analysis period (Figure 3.4 lower, next page).

Glaciers such as Zongo and Antizana, which maintain considerable accumulation zones at high altitudes (greater than 5,500 masl) may recover mass in certain years, even if the loss

is greater than the accumulation. However, the mass balances of the Chacaltaya and Charquini Sur glaciers, both with surface areas less than 0.5 km<sup>2</sup>, have been consistently negative. Even the Charquini Sur glacier, which was selected as an alternative source of information to Chacaltaya, experienced a similar deficit during the first three years of measurements.

Based on these observations, it may be concluded that small glaciers without a permanent accumulation zone are strongly unbalanced.

A deficit of around 1,000 mm w.e. a<sup>-1</sup> may lead to their extinction within a decade or two. Likewise, if the lag of several months that occurs because of the different periodicity of hydrological years is taken into account, it may be concluded that glaciers such as Zongo and Antizana 15α, separated by 16 degrees of latitude, have experienced a similar evolution.

### 3.2.2 Comparison between the ablation rates and compared seasonality in Bolivia and Ecuador

The mass balance in the ablation zone reflects the evolution of the surface energy balance of a glacier. Figure 3.5 (page 49) presents this indicator measured in different areas of the ablation zone of the Zongo, Chacaltaya and Charquini Sur glaciers in Bolivia and the Antizana 15α glacier in Ecuador.

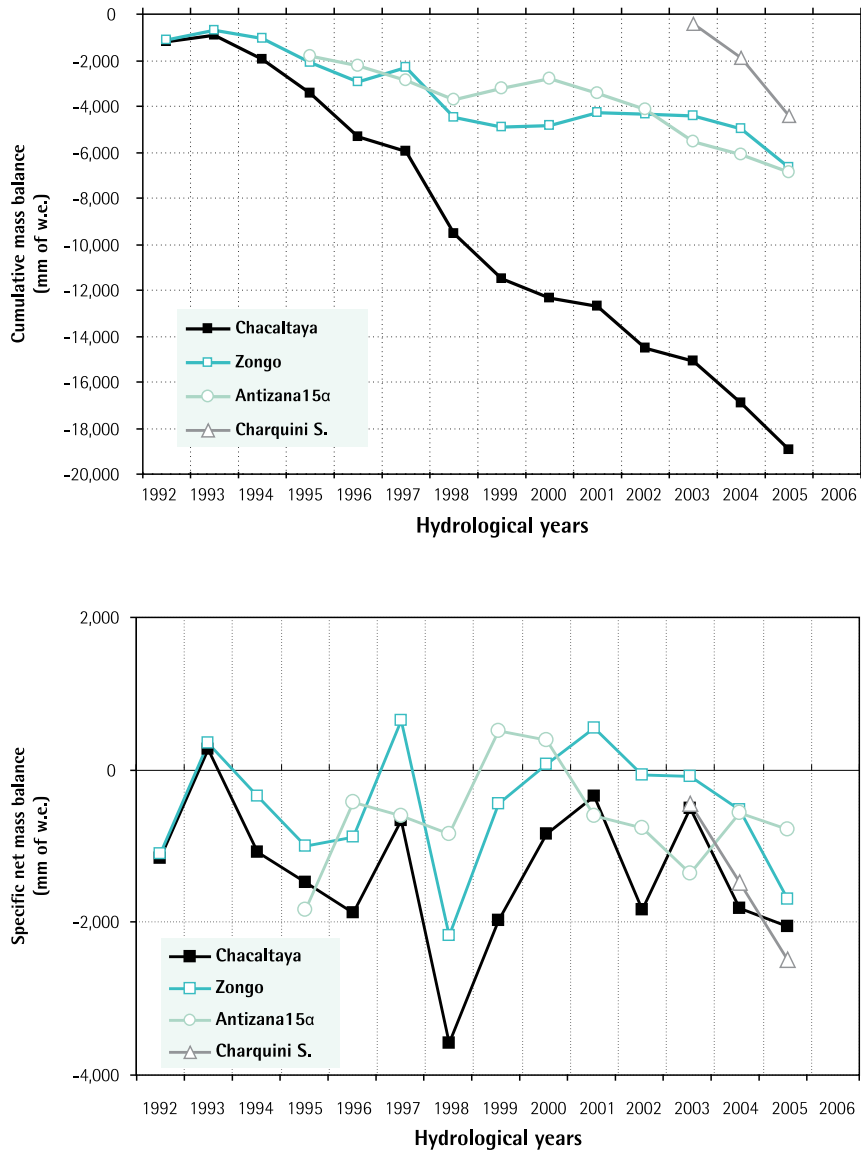
While the comparison of ablation rates does not provide much information, because these depend on the particular

conditions of each glacier, it is possible to examine the simultaneity in their evolution. In the four glaciers mentioned, the ablation rates were greater in 1995, 1997 and 1998; and lower in 1993, 1996, 1999 and 2000. Also, it may be observed that the evolution of the Antizana glacier was ahead of the evolution of the Bolivian glaciers by at least six months. It may be implied that this phenomenon is due to the weak effect of seasonality in areas close to the equatorial line. In fact, climate changes that occur at any moment of the year would be immediately reflected in the evolution of the Antizana glacier, while in Bolivia this would take place only in the summer (October-March).

<sup>12</sup> Note that the hydrological years are different for Bolivia and Ecuador. For the Zongo and Chacaltaya glaciers, 1992 is considered to be the period from September 1991–August 1992, while for Antizana 15α, it is January–December 1992.

Figure 3.4

- Annual and cumulative evolution of the glacier mass balances  
Chacaltaya, Zongo, Antisana 15α and Charquini Sur -



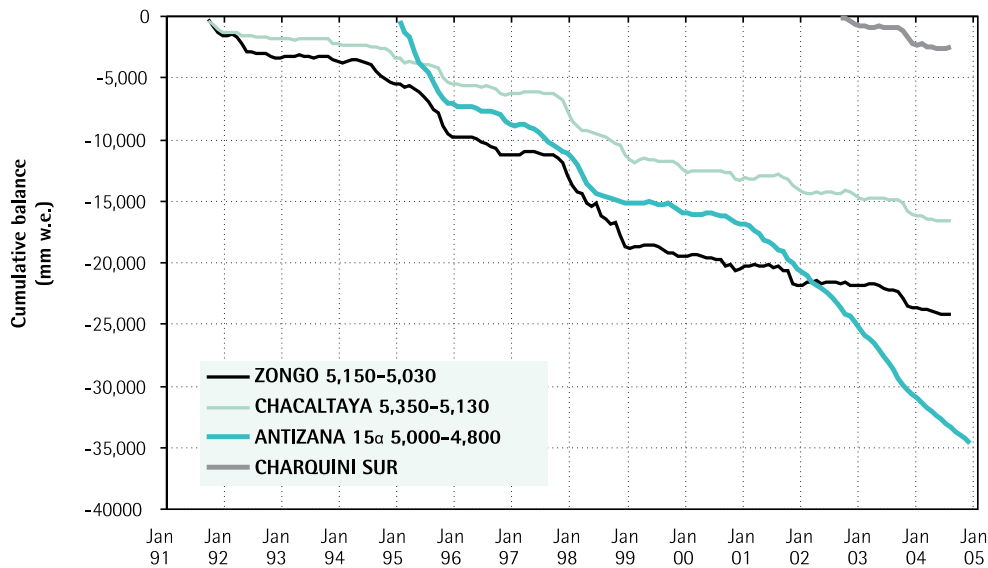
Source: IRD, IHH, SENAMHI Bolivia, INAMHI, EMAAP-Q.

In Bolivia, the annual ablation takes place mainly between the months of October and April. These months represent 98% of the mass balance interannual variability, of which 78% is produced between December and February (Francou et al., 2003) (see Figure 3.6 upper, next page). This strong seasonality is the consequence of the cumulative effects of different flows over the surface of the glacier.

In Ecuador, although ablation is intense throughout the year, maximum variability occurs from April to May and from August to September – that is, on the dates closest to the equinoxes (Figure 3.6 lower, next page). In terms of processes, the differences between the outer tropics (Bolivia, 16°S) and the inner tropics (Ecuador, 0°28S) are not only due to the seasonality of ablation but also to the processes themselves that are responsible for ablation.

**Figure 3.5**

- Cumulative mass balance in different areas of the ablation zone in four glaciers<sup>13</sup> -

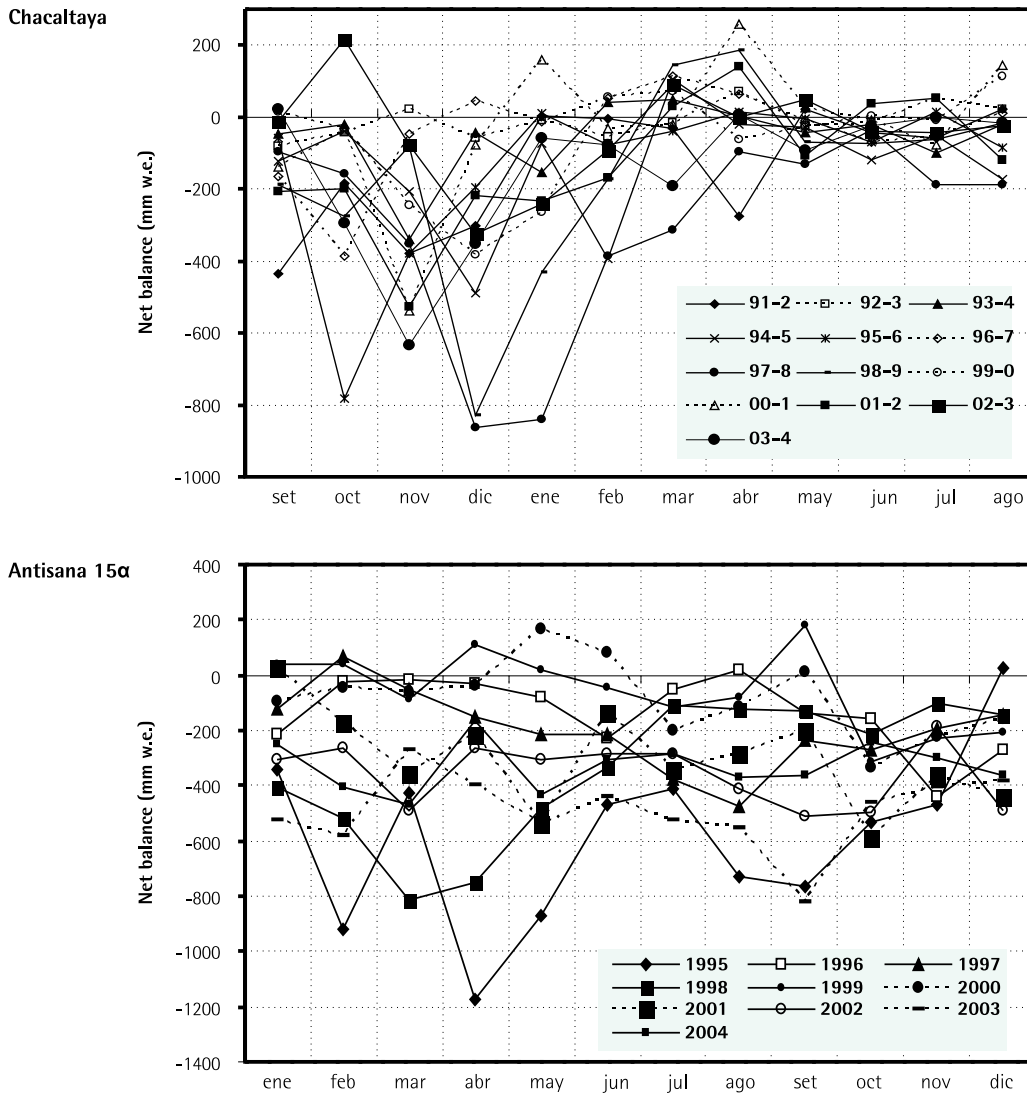


Source: IRD, IHH, SEMAMHI Bolivia, INAMHI.

<sup>13</sup> Note that the altitudes are not the same as those of Figure 3.4, in page 48. This graph includes the entire surface of the Chacaltaya and Charquini Sur glaciers, most of the lower zone of Antizana 15α and a significant part of the upper ablation zone of the Zongo glacier. The frontal zone of this glacier was not included due to the fact that its elevated slope alters the measurement.

Figure 3.6

- Mass balance in the ablation zones of the Chacaltaya (Bolivia) and Antisana 15α (Ecuador) glaciers<sup>14</sup> -



Fuente: Francou et al., 2003; 2004

<sup>14</sup> Mass balance values expressed in millimeters of water equivalent. The data from the Chacaltaya glacier are from September to August, while those of Antisana 15α are from January to December.

### 3.2.3 Mass balance and surface temperature of the equatorial Pacific: Influence of ENSO

The two opposing phases of ENSO events explain the most contrasting situations observed in the glaciers of the Central Andes, both in Bolivia and in Ecuador.

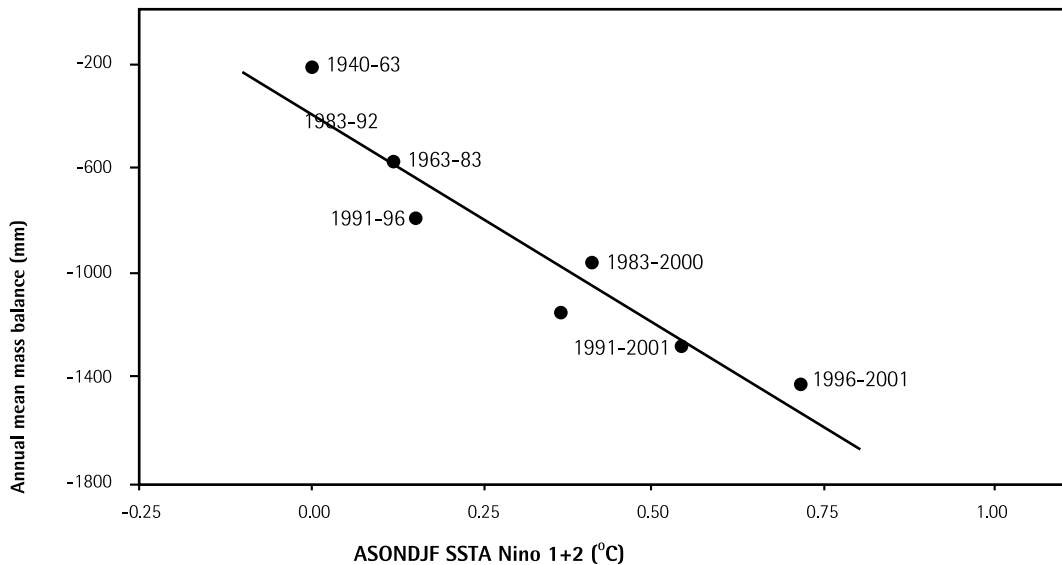
In the Antizana 15α glacier, the mass balance is closely correlated (negatively) to the sea surface temperature in the Niño-4 sector of the equatorial Pacific<sup>15</sup>. Figure 3.8 (next page) shows the close correlation (i) between the ablation rates in the lower part of the glacier (under 5,000 masl) and an ENSO indicator in the Central Pacific; and (ii), between the same ablation rates and the reanalyzed temperature at the altitude of the glacier.

In Bolivia, a correlation may be observed between the mass balance of the Chacaltaya glacier and the sea surface temperature. In the Niño 1+2 sector during the summer months, the correlation shows a two-month phase lag (August and February). This relation may be observed in Figure 3.7 (below).

Likewise, Arnaud et al. (2001) analyzed the influence of ENSO on precipitation and temperature in the region of the Sajama volcano, located in the western part of the Bolivian highlands, 100 km from the Pacific coast. The authors examined the altitude variation of a portion of the snowline between 1963 and 1998. The results show a general elevation of the snowline between 1963 and 1998, with a sustained increase between 1984 and 1990, as shown in Figure 3.9 (page 53).

Figure 3.7

- Relation between the mass balance of the Chacaltaya glacier and the sea surface temperature in the Niño1+2 sectors<sup>16</sup> -



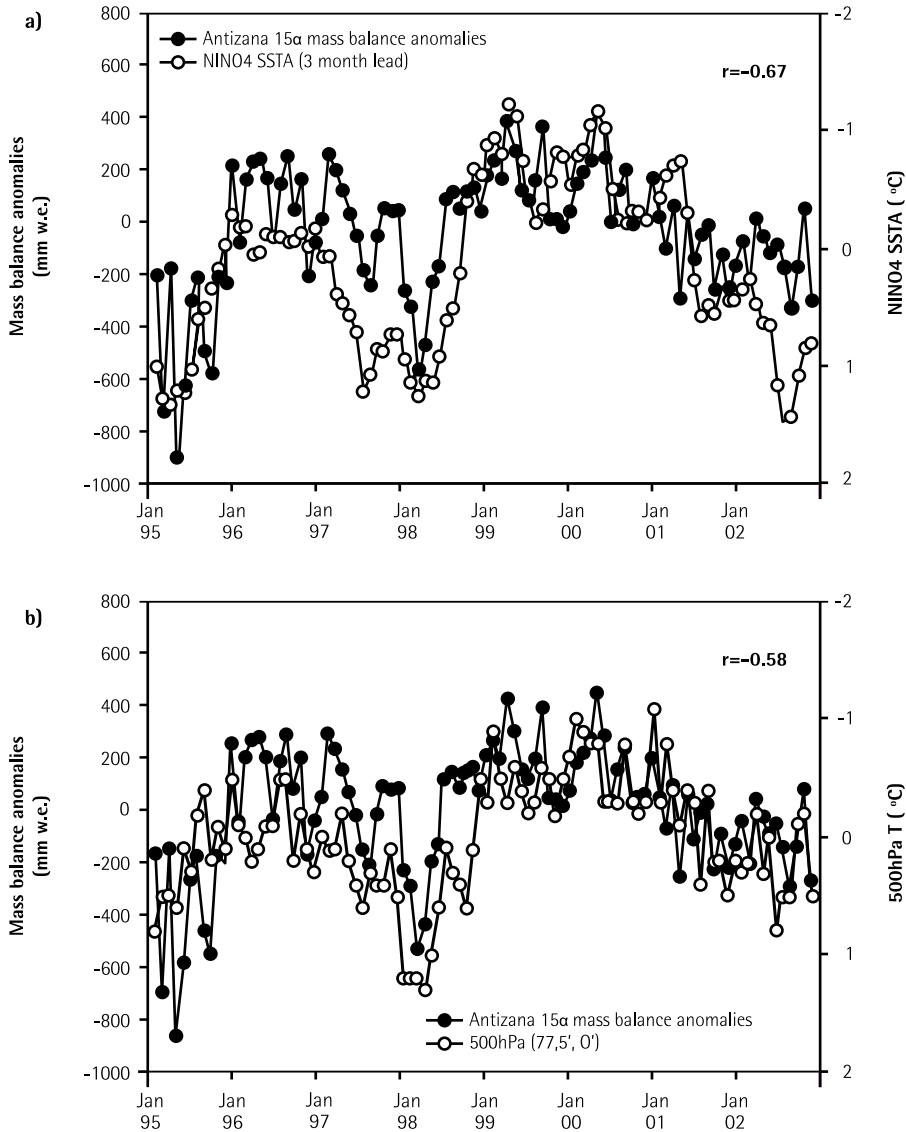
Fuente: Francou et al., 2003

<sup>15</sup> The equatorial Pacific is divided into four "El Niño" sectors which go from Niño-1 (northern Peru-Ecuadorian coast) to Niño-4.

<sup>16</sup> Sub- and multi-decade annual mass balance averages. Sea surface temperature measured between August and December.

Figure 3.8

- Anomalies between the mass balance in the lower part of Antizana 15α (Ecuador) and the sea surface temperature in the Niño-4 sector<sup>17</sup> -

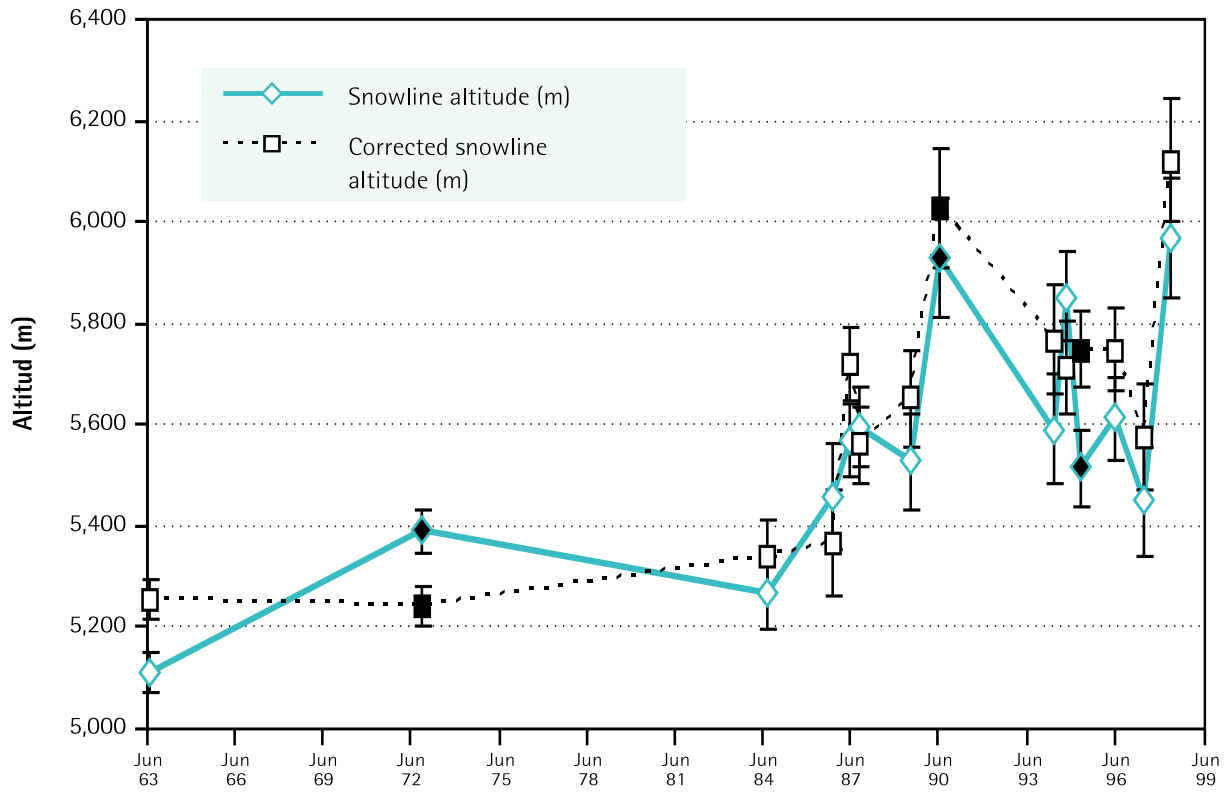


Source: Francou et al., 2004

<sup>17</sup> Upper figure: Anomalies regarding the average between the mass balance of the lower part of the Antizana 15α glacier and the sea surface temperature in the Niño-4 sector.  
Lower figure: The same mass balance anomaly in relation to the temperature of the atmosphere at 500 hPa. Values expressed in millimeters of water equivalent.

Figure 3.9

- Evolution of the snowline of the Sajama volcano -



Source: Arnaud et al, 2001.



### 3.3 Is the glacier retreat in the Andes exceptional?

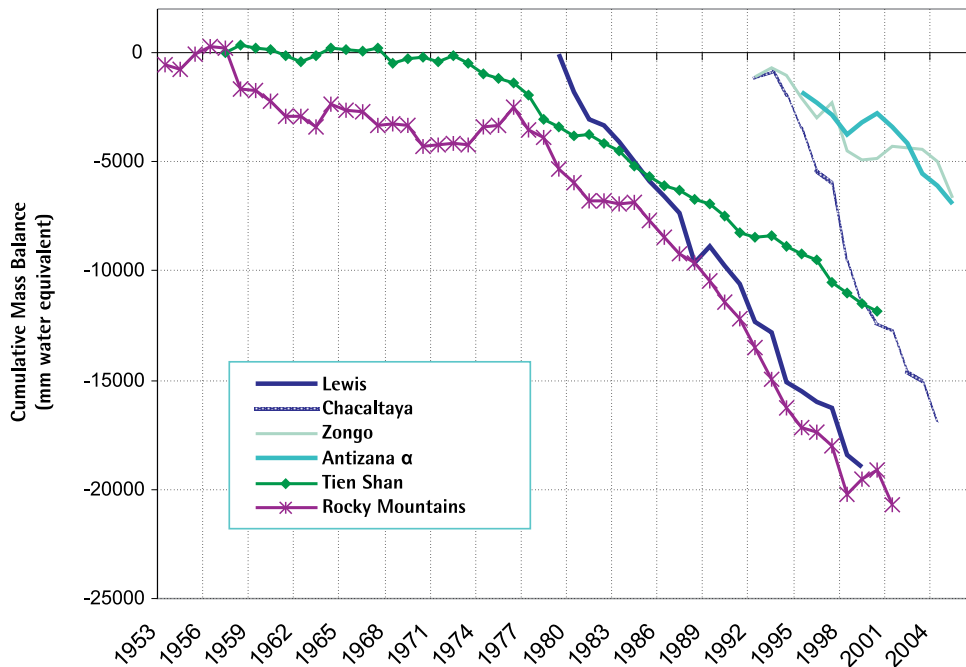
In a recent study, Francou and Vincent (2007) compiled information on 75 mountain glaciers located in different massifs of the world. This information offers the possibility of comparing the retreat rates of tropical glaciers with those of glaciers located in other latitudes.

As seen in Figure 3.10 (below), the retreat rate determined from the cumulative mass balances of the Central Andes

(600–400 mm w.e. a<sup>-1</sup>) is not exceptional when compared with the averages calculated in the massifs of the Rocky Mountains (North America) or Tien-Shan (Central Asia). “Small” glaciers located in tropical regions such as Kenya and Bolivia suffer similar losses (about 1,000 mm w.e. a<sup>-1</sup>).

Figure 3.10

- Cumulative evolution of mass balance in different glaciers of the world<sup>18</sup> -



Source: Francou and Vincent, 2007

<sup>18</sup> Three glaciers of the Central Andes (Chacaltaya, Antizana 15α and Zongo), the Lewis glacier (Kenya), others located in the Rocky Mountains (North América) and Tien Shan massifs (Central Africa).

### 3.4 Conclusions on the relation between glacier retreat and regional climate change

More than a decade of observing glaciers allows the following conclusions to be drawn:

- a. The retreat of glaciers located in the Andean Tropics has intensified since the end of the 1970s.
- b. The magnitude of the retreat depends on the size of the glacier. Those glaciers considered large have lost between 400 and 600 mm w.e.  $a^{-1}$  since the beginning of the observation (1991–1995), while small glaciers have retreated at greater rates (between 1,000 and 1,300 mm w.e.  $a^{-1}$ ). Given that the Equilibrium Line Altitude (ELA) is located above 5,000 masl, glaciers that do not have large areas above this level are in danger of extinction in the near future. This is the case with Chacaltaya.
- c. Mass balance measurements have revealed the existence of great variability within the seasonal pattern, this variability is more intense in certain months. This suggests that the relation between climate and mass balance is concentrated in key periods during which the radiative flow is highest in the upper atmosphere and precipitation is strong but variable.
- d. The contribution of warm (weak or moderate) ENSO events to the retreat of tropical glaciers in the Andes has been significant. Some cold events may restore part of the ice mass, but only in glaciers with large accumulation

areas located above 5,400 masl. Small glaciers do not recover mass, they only reduce their deficit.

- e. Due to important differences in the climate seasonality in the inner tropics (Ecuador) and the outer tropics (Peru and Bolivia), the active processes in the surface of a glacier must also be different.
- f. The glacier retreat rate in the Central Andes does not seem to be exceptionally high in comparison with the rest of the world. Other tropical glaciers are retreating at similar rates, such as the Lewis glacier in Kenya, but continuous observations are too irregular to be certain. Although no generalizations can be made, similar retreat rates have been observed in non-tropical areas.

More observation is necessary to confirm whether the current retreat is a long-term process related to global warming.

The observation carried out shows that the "Pacific Shift" has played a fundamental role in the acceleration of the Andean glaciers retreat since 1976. For this reason, it is necessary to continue analyzing the effect of the behavior of the Pacific Ocean on the glaciers of the region and how this combines with the trend toward atmospheric warming that scientists predict for the future.



# ¿EL FIN DE LAS CUMBRES NEVADAS? Glaciares y Cambio Climático en la Comunidad Andina

COMUNIDAD  
ANDINA  
SECRETARÍA GENERAL



IRD  
Institut de recherche  
pour le développement



Publicado por la Secretaría General de la Comunidad Andina, el Instituto de Investigación para el Desarrollo, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Oficina Regional para América Latina y el Caribe y la Agencia Española de Cooperación Internacional.

Derechos de propiedad intelectual © 2007, Secretaría General de la Comunidad Andina, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y Agencia Española de Cooperación Internacional.

Está autorizada la reproducción total o parcial y de cualquier otra forma de esta publicación para fines educativos o sin fines de lucro, sin ningún otro permiso especial del titular de los derechos, bajo la condición de que se indique la fuente de la que proviene.

La Secretaría General de la Comunidad Andina, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y la Agencia Española de Cooperación Internacional agradecerán que se les remita un ejemplar de cualquier texto cuya fuente haya sido la presente publicación.

No está autorizado el empleo de esta publicación para su venta o para otros usos comerciales.

#### DESCARGO DE RESPONSABILIDAD

Producido por el equipo Great Ice del Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD) en coordinación con la Secretaría General de la Comunidad Andina y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (Oficina Regional para América Latina y el Caribe).

Para más información y detalles de cómo obtener copias de esta publicación por favor contáctenos:

Comunidad Andina  
Secretaría General  
Paseo de la República 3895, Lima 27, Perú  
Teléfono: (51 1) 411-1400 / Fax: (51 1) 221-3329  
[www.comunidadandina.org](http://www.comunidadandina.org)  
Casilla Postal: 18-1177  
Lima 18 - Perú

Impreso por Typographics E.I.R.L.


Línea gráfica, edición técnica, corrección de estilo, traducción y cuidado de edición por:  
Libélula Comunicación, Ambiente y Desarrollo S.A.C.

Fotografías:

© IRD-Bernard Francou (páginas 15, 18 y 30), © Paolo López (página 90) y © Heinz Plenge (páginas 42, 56, 64, 74 y 85)

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2007-09922

ISBN 978-9972-787-28-7



# IS IT THE END OF SNOWY HEIGHTS? Glaciers and Climate Change in the Andean Community

Published by the General Secretariat of the Andean Community, the French Institute of Research for Development, the United Nations Environmental Programme (Regional Office for Latin America and the Caribbean), and the Spanish International Cooperation Agency.

Intellectual Property Rights © 2007, General Secretariat of the Andean Community, United Nations Programme for the Environment and Spanish International Cooperation Agency.

Full, partial or other reproduction of this publication for educational or non-for-profit purposes is authorized without any other special permission from the copyright holder, provided that reference is made to the source.

The General Secretariat of the Andean Community, the United Nations Environmental Programme, and the Spanish International Cooperation Agency will appreciate receiving a copy of any text based on this publication.

The use of this publication for sale or other commercial uses is not authorized.

#### DISCLAIMER

Produced by the Great Ice team from the French Institute of Research for Development (IRD) in coordination with the General Secretariat of the Andean Community and the United Nations Environmental Programme (Regional Office for Latin America and the Caribbean).

For additional information and details on how to obtain copies of this publication, please contact us:

Comunidad Andina  
Secretaría General  
Paseo de la República 3895, Lima 27, Peru  
Telephone: (51 1) 411-1400 / Fax: (51 1) 221-3329  
[www.comunidadandina.org](http://www.comunidadandina.org)  
Casilla Postal: 18-1177  
Lima 18 – Peru

Printed by Typographics E.I.R.L.

Graphic design, technical edition, style correction, translation and publishing coordination by:  
Libélula Comunicación, Ambiente y Desarrollo S.A.C.

#### Photographs:

© IRD-Bernard Francou (pages 15, 18 and 30), © Paolo López (page 90) and © Heinz Plenge (pages 42, 56, 64, 74 and 85)

Legal Deposit N° 2007 - 09922 made in the National Library of Peru

ISBN 978-9972-787-28-7