

Sección 4

Fluctuaciones glaciares en los Andes Centrales durante el último Milenio

El programa Great Ice del IRD¹⁹ ha orientado recientemente sus estudios hacia reconstruir las fluctuaciones registradas en los glaciares durante los últimos siglos (1350-1950). Estas observaciones son un factor clave para conocer mejor el comportamiento de los glaciares en el marco de la variabilidad del clima actual, y así reconstruir la variabilidad climática a escala multianual en base a las fluctuaciones glaciares pasadas.

Se han concentrado los estudios sobre el período denominado como "pequeña edad de hielo" (siglos ~XIV-XIX) porque los testigos dejados por los glaciares (cordones morrenicos, generalmente) durante esos seis siglos son claramente identificables y favorables a la aplicación de métodos de dataciones absolutas. El término "pequeña edad de hielo" (PEH) fue propuesto por Matthes (1939) para describir

un periodo glacial que ocurrió durante el último milenio. Durante las últimas décadas, se han encontrado muchas evidencias sobre la extensión de la PEH en diferentes macizos montañosos ubicados en ambos hemisferios (Alaska, las Montañas Rocosas, los Alpes, el Cáucaso, Tien Shan, Nueva Zelanda, Patagonia y la Antártida).

Desde un punto de vista climatológico, la PEH puede ser definida como un periodo de frío que ocurrió entre los siglos XIV y XIX. Diferentes estimados calculan que la temperatura media en este periodo fue entre 1 y 2°C más baja que el promedio 1961-1990, con un mayor nivel de precipitaciones invernales. Sin embargo, reconstrucciones recientes revelan que existió una alta variabilidad, tanto espacial como temporal (Matthews y Briffa, 2005).

4.1 ¿Cuál es la importancia de estudiar la Pequeña Edad de Hielo?

La PEH es un ejemplo perfecto de variabilidad climática natural, el cual sirve de base para analizar los efectos de la acción humana sobre el planeta. Este periodo es también importante para analizar tendencias climáticas futuras, ya que algunos estimados pronostican para finales del siglo XXI cambios de temperatura similares a los ocurridos durante la PEH.

Los glaciares tropicales son especialmente sensibles a los cambios climáticos. Proporcionan tanto un archivo de los cambios ocurridos en el pasado como una herramienta para investigar la variabilidad climática regional y su relación con las latitudes

medias y altas en ambos hemisferios.

La variabilidad del clima durante los últimos siglos ha generado fluctuaciones de la extensión de los glaciares. La documentación de la evolución pasada de los glaciares constituye un marco de referencia para comparar las proyecciones sobre su evolución futura. Este es un tema de fundamental importancia para los países andinos, debido a que el agua proveniente del derretimiento de glaciares proporciona una de las principales fuentes de producción de energía eléctrica en la región y abastece de agua potable a algunas de sus ciudades principales.

¹⁹ Los autores de esta sección son Vincent Jomelli, Antoine Rabatel, Patrick Ginot, Vincent Favier, Delphine Grancher, Daniel Brunstein, Jesus Gomez, Abraham Machaca y Bolívar Cáceres

4.2 La historia regional de las fluctuaciones glaciares

Con el fin de documentar la PEH en los Andes, científicos del IRD (Francia), la Universidad Mayor de San Andrés (Bolivia), Inrena (Perú) e Inamhi (Ecuador) realizaron un estudio de 90 glaciares ubicados en Bolivia, Ecuador y Perú (Rabatel et al., 2005, 2006, Jomelli et al., 2006a,b). Los métodos utilizados para datar las morrenas fueron esencialmente en base a la liquenometría, es decir, la calibración en función del tiempo del crecimiento de una especie de líquen encontrada comúnmente sobre los bloques (Jomelli et al., 2006a). A pesar de que la liquenometría debe ser cruzada con otros métodos para proporcionar fechas definitivas, el estudio de la especie *Rhizocarpon Geographicum*, ha encontrado condiciones muy favorables en los altos Andes tropicales.

Para procesar los datos de campo, se ha implementado un nuevo método estadístico (Naveau et al., 2006). Para reconstruir las superficies y volúmenes de glaciares emplearon análisis fotogramétricos y levantamientos topográficos de campo en un número apreciable de sistemas morrénicos PEH, particularmente en Bolivia. (Rabatel et al., 2006).

4.2.1 Extensión máxima de la PEH en los Andes centrales

En el Ecuador (entre los paralelos 0°S y 6°S) la extensión máxima de la PEH ocurrió en dos periodos. En glaciares ubicados por encima de los 5,700 msnm (volcanes como el Chimborazo o Antizana), ésta ocurrió alrededor de 1730. En glaciares ubicados en picos de altura inferior a los 5,400 msnm, la extensión máxima de la PEH ocurrió alrededor de 1830. Otras mediciones señalan que este último avance glaciar también ocurrió en picos de gran altura (Jomelli et al., 2006c).

Asimismo, en el Ecuador y en Perú, varios archivos históricos tales como pinturas, grabados, o relatos de viajeros fueron utilizados como soporte documental para estimar las extensiones glaciares y sus fechas (Franco, 2004). Los resultados de esta investigación muestran evidencias del avance de la PEH en los Andes Tropicales.

En la base de glaciares de entre 4,100 y 4,300 msnm ubicados en las cordilleras Blanca (Perú) y Real (Bolivia), se pueden encontrar morrenas que datan del siglo XIV, lo que sugiere la ocurrencia de un avance glaciar durante los primeros siglos del último milenio. Las morrenas depositadas antes del siglo XIV son mucho más antiguas, por lo que la extensión de los glaciares se habría reducido a principios del último milenio. Sin embargo, en muchos glaciares el estadio morrénico del siglo XIV no está representado, como en los casos de los glaciares Llaca o de Kinzl en la Cordillera Blanca.

El estadio del siglo XIV no ha sido observado ni en Ecuador ni en Bolivia, donde probablemente existió pero fue cubierto por los avances máximos ocurridos durante los siglos XVII y XVIII.

En Venezuela también se registraron avances glaciares en dos periodos (Polissar et al., 2006). El primero ocurrió entre 1640 y 1730 y el segundo entre 1800 y 1820.

En los trópicos externos, (entre los paralelos 10°S y 16°S) la extensión máxima de la PEH ocurrió unas décadas antes. En la Cordillera Blanca, ésta ocurrió alrededor de 1630. En Bolivia, los glaciares alcanzaron su extensión máxima entre 1657 y 1686 (Rabatel, 2005; Rabatel et al., 2005, 2006).

4.2.2 La deglaciación ocurrida entre los siglos XVII y XX

Desde la extensión máxima de la PEH, los glaciares han evolucionado de una manera notablemente homogénea (Figura 4.1, abajo). El retroceso ocurrió lentamente entre los siglos XVIII y XIX, pero se aceleró rápidamente a partir de 1840 (especialmente entre 1880 y 1910).

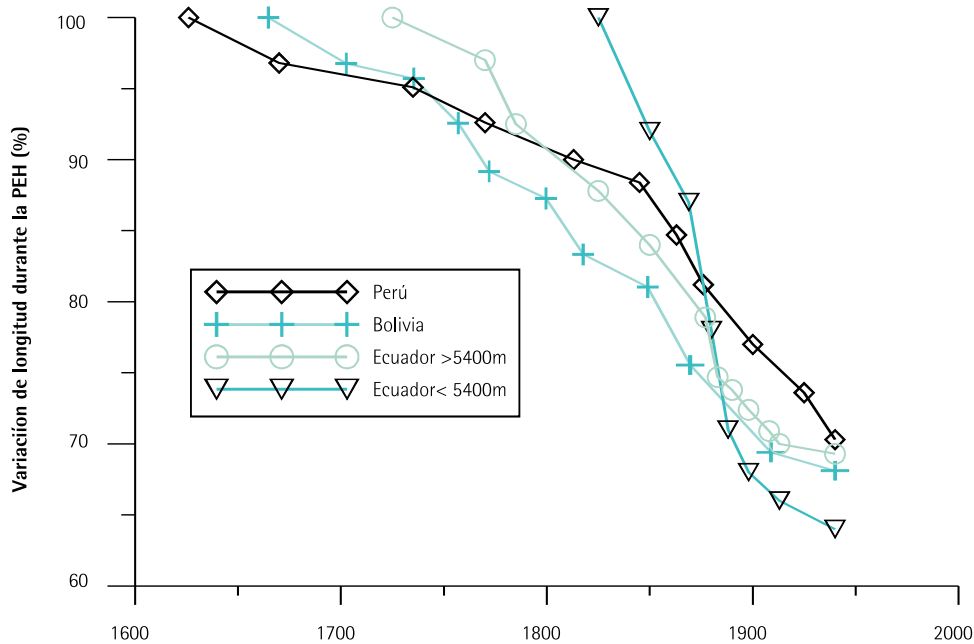
En el Ecuador, se registraron dos avances glaciales inmediatamente posteriores a la extensión máxima de la PEH en siete glaciares situados en volcanes de gran altitud (aproximadamente 1748 y 1786). Las morrenas ubicadas cerca de lo que fue la extensión máxima de los glaciares permiten estimar un lento retroceso de entre 7 y 15% de su largo total durante el siglo XVIII.

Otro avance de importancia ocurrió alrededor de 1830, periodo durante el cual los glaciares ubicados en picos de baja altura avanzaron mas allá del punto máximo registrado en el siglo XVIII. Desde este momento, todos los glaciares, desde aquellos ubicados entre 6,000 y 5,400 msnm mostraron un patrón idéntico: un ligero retroceso hasta mediados del siglo XIX, y un fuerte repliegue entre 1870 y principios del siglo XX. Entre 1830 y 1870, los glaciares ubicados a grandes alturas perdieron 15% de su extensión, mientras que aquellos ubicados a alturas menores perdieron el 18%.

Desde principios del siglo XX y hasta 1950, el retroceso fue relativamente moderado. La pérdida fue de 11 y 15% para los glaciares de alta y baja altitud, respectivamente.

Figura 4.1

- Andes Tropicales: Evolución desde la extensión máxima de la PEH -



Los glaciares ubicados en los trópicos externos mostraron el mismo patrón. Luego de alcanzar su máxima extensión en la segunda mitad del siglo XVII, retrocedieron continuamente durante los siglos XVIII y XIX, periodo en el cual sólo se produjeron avances menores (como los producidos en las décadas de los 1730s y 1800s). Es importante mencionar que este retroceso continuo ocurrió únicamente en los Andes Tropicales, ya que los glaciares ubicados en el hemisferio norte registraron avances entre 1550 y 1880.

En Bolivia, Rabatel et al. (2006) observaron que durante el periodo comprendido entre mediados del siglo XVII y finales del XIX, todos los glaciares retrocedieron alrededor de 1,000 m. Expresado en términos de promedios anuales para los diferentes glaciares, la reducción en área fue de 0.15% por

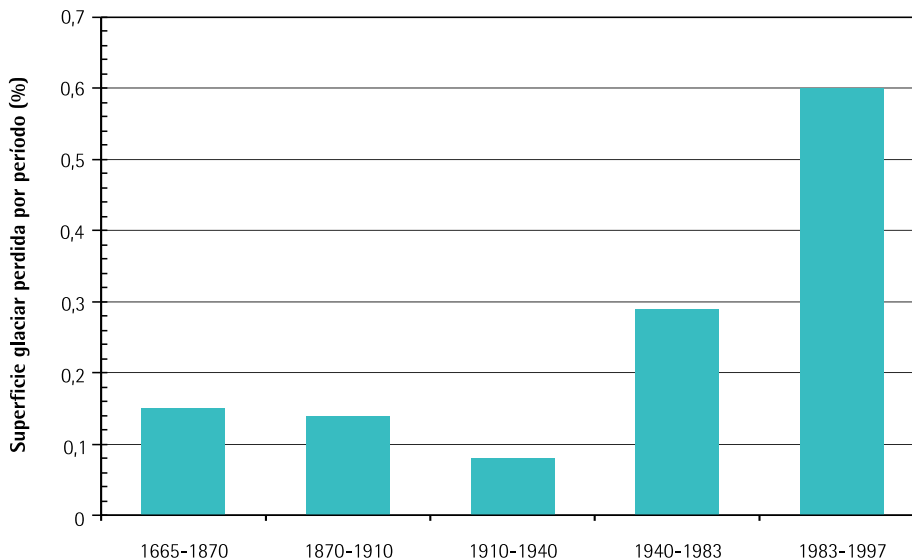
año entre la máxima extensión de la PEH y finales del siglo XIX (ver Figura 4.2, abajo).

Los glaciares peruanos y bolivianos perdieron alrededor de 15% de su área en el siglo XVIII, y cerca de 19% en el siglo XIX. Durante las primeras décadas del siglo XX, los glaciares ubicados en la Cordillera Blanca y la Cordillera Real retrocedieron lentamente, con excepción de un importante avance ocurrido en los 1920s. Otro importante retroceso ocurrió en los 1930s y 1940s (Kaser y Georges, 1997; Georges, 2004).

Durante la segunda mitad del siglo XX, el retroceso glaciar se aceleró fuertemente (ver sección 1). En efecto, éste sería de la misma magnitud que aquel ocurrido entre la extensión máxima de la PEH y mediados del siglo XX.

Figura 4.2

- Pérdidas de áreas por periodo de los glaciares del Charquini (Cordillera Real, Bolivia) -



Fuente: Rabatel (2005)

4.2.3 Evolución comparada de glaciares durante la PEH

Entre inicios de la PEH y principios del siglo XX, la mayoría de los avances y retrocesos ocurridos en los glaciares andinos ocurrieron también en cadenas montañosas ubicadas en latitudes medias. En efecto, extensiones importantes de glaciares se observaron en los Alpes europeos y las Montañas Rocosas canadienses tanto en el siglo XIV como a mediados y fines del siglo XVII (Grove, 1988; Luckman, 2000; Le Roy Ladurie, 2004). Durante la primera mitad del siglo XVIII, éstas también ocurrieron en Escandinavia (Nesje y Dahl, 2000), Patagonia (Luckman y Villalba, 2001) y los Alpes del sur en Nueva Zelanda (Winkler, 2004). También se registraron avances glaciares a principios del siglo XIX en los Alpes.

También se registra paralelismo en varias fases de retroceso glaciar. Durante la segunda mitad del siglo XVIII tanto glaciares ubicados en los Andes Tropicales como

en los Alpes (Zumbühl y Holzhauser, 1988) y la cadena montañosa escandinava (Nesje y Dahl, 2003), retrocedieron progresivamente. Asimismo, el incremento en la velocidad del retroceso ocurrido entre 1860-1870 y principios del siglo XX coincide con procesos similares en todo el mundo, particularmente en los Alpes (Grove, 1988).

Sin embargo, también existen diferencias importantes. Por ejemplo, la magnitud de los avances fue claramente diferente entre los distintos macizos montañosos a nivel mundial. Por un lado, el máximo avance glaciar no ocurrió al mismo tiempo en las diferentes cordilleras de los Andes Tropicales y el resto del mundo. Por otro lado, en los Andes Tropicales ocurrió solamente una fase de extensión máxima de los glaciares durante la PEH desde el siglo XVII en adelante, mientras que en los Alpes al menos se registraron tres avances glaciares de la misma magnitud en el mismo periodo.

4.3 Condiciones climáticas que explicarían la evolución de los glaciares tropicales durante la PEH

Diversos estudios han mostrado que la variabilidad interanual del balance de masa de los glaciares tropicales depende en gran parte de la variabilidad de las precipitaciones sólidas²⁰. Esta variabilidad está condicionada no solamente por la cantidad de precipitaciones sólidas que caen sobre las superficies glaciares y que se incorporan a la masa del glaciar, sino también por la fase líquida/sólida de esas precipitaciones en la zona de ablación, la cual depende directamente de la temperatura atmosférica. En efecto, si la temperatura del aire aumenta, también lo hace la altura a la cual la precipitación se convierte de líquida en nieve.

Este cambio de fase de la precipitación afecta más a los glaciares ubicados en las zonas húmedas cercanas a la línea ecuatorial, (Ecuador o Colombia), donde llega en promedio a más baja altura que los glaciares cercanos al trópico que, por estar en regiones más secas, se ubican en promedio a mayor altitud. La ocurrencia de lluvias sobre los glaciares tiene un efecto sobre el albedo y aumenta el valor del balance neto radiativo (ver sección 5).

El máximo de la PEH ocurrió en Perú y Bolivia durante un período conocido como el "mínimo de insolación de Maunder" (1645-1715) durante el cual la radiación solar incidente fue aproximadamente 0.24% más baja que ahora, lo cual pudo generar un enfriamiento atmosférico mundial de aproximadamente 1°C (Rind et al. 2004). Esta coincidencia refuerza los argumentos sobre la relación entre actividad solar y expansión de los glaciares (Eddy, 1976). En los trópicos, esta relación podría ser más evidente porque el balance radiativo es uno de los factores claves del funcionamiento de los glaciares de esta zona (Wagnon et al., 1999).

En el Ecuador, condiciones un poco más secas o más cálidas a mitad del siglo XVII en relación con el siglo XVIII podrían explicar la diferente temporalidad del máximo de la PEH en comparación con Bolivia y el Perú. En efecto, durante la PEH, la ELA se encontraba alrededor de 150 m por debajo de lo que se encuentra hoy, razón por la cual la menor altitud en la cual se encontraban los frentes de los glaciares (aproximadamente 600 m) habría sido la consecuencia necesaria de un proceso de acumulación más intenso que en la actualidad.

La hipótesis de aumento de precipitación está en acuerdo con otros indicadores del clima. Varios testigos de hielo extraídos de nevados ubicados en Andes Tropicales sugieren condiciones más frías durante esa época (Thompson et al. 1985, 2006).

A pesar de los esfuerzos realizados esos últimos años por el equipo Great Ice del IRD para construir una cronología precisa de las fluctuaciones de los glaciares desde el principio de la PEH en los Andes Centrales, mucho trabajo queda pendiente para reconstruir la variabilidad climática a partir de este indicador. La primera etapa será construir modelos robustos que relacionen fluctuaciones históricas de los glaciares con el clima. Los escenarios climáticos esperados como resultado de este proceso tendrán que ser calibrados luego sobre los otros "proxies" del clima, los testigos de hielo de los casquetes de altura, indicadores de la cobertura vegetal (dendroclimatología y palinología), etc.

²⁰ Wagnon et al., 1999; Francou et al., 2003, 2004; Favier et al., 2004a; Sicart et al., 2005. Para más informaciones, ver sección 5.

Recuadro 4.1

- Glaciares con las morrenas de la Pequeña Edad de Hielo-

Circo glaciar de la Caldera del Altar (Ecuador). En la foto de arriba, según una acuarela de Rodolf Reschreiter datando de 1903, con el glaciar cubriendo el circo entero. Se ve que el glaciar ha disminuido desde el depósito de las morrenas laterales, correspondiendo a una fase máxima de la Pequeña Edad de Hielo.

En la foto de abajo aparece el mismo circo en el 2001, mostrando el retroceso de los glaciares hacia las paredes del circo superior. La Laguna Amarilla tiene una profundidad medida de 50 metros, se estima que la lengua del glaciar a los siglos XVII-XIX debía tener más de 100 metros de espesor sobre el sitio que ella ocupa actualmente.

© Colección particular
© IRD- Bernard Francou



©IRD- Bernard Francou



Section 4

Glacial fluctuations in the Central Andes during the last millenium

IRD's Great Ice program¹⁹ has recently focused on reconstructing the fluctuations recorded in glaciers in the last centuries. These observations are a key factor in getting a better understanding of glacier behavior patterns given the present climate variability and thus reconstruct the multiannual climate variability based on past glacier fluctuations.

Studies have focused on the period known as the little ice age (centuries ~XIV to XIX) because controls left by glaciers (moraine cordons, generally) during these six centuries are clearly identifiable and favorable to using absolute date methods.

The term "little ice age" (LIA) was proposed by Matthes (1939) to describe a glacial period that occurred during the

last millennium. During the last few decades, a great deal of evidence has been found of the extension of the LIA in different mountain massifs in both hemispheres (Alaska, the Rocky Mountains, the Alps, the Caucasus, Tien Shan, New Zealand, Patagonia and Antarctica).

From a climatological point of view, the LIA may be defined as a cold period that occurred between the 14th and 16th centuries. Different estimates show that the mean temperature in this period was between 1 and 2°C lower than the average between 1961-1990, with a higher level of wintertime precipitation. However, recent reconstructions reveal that there was a high level of variability, both spatial and temporal (Matthews and Briffa, 2005).

4.1 What is the importance of studying the Little Ice Age (LIA)?

The LIA is a perfect example of natural climate variability, which serves as a basis for analyzing the effects of human action on the planet. This period is also important for analyzing future climate trends, since some estimates show temperature changes at the end of the 21st century similar to those occurred during the LIA.

Tropical glaciers are especially sensitive to climate change. They provide both an archive of past changes as well as a tool for researching regional climate variability and its relation to the middle and high latitudes in both hemispheres.

The variability of the climate during the last few centuries has generated fluctuations in the extension of glaciers. Documentation of the past evolution of glaciers constitutes a reference for comparing projections of their future evolution. This is a matter of fundamental importance for the Andean countries, due to the fact that the water coming from the melting of glaciers provides one of the main sources of electrical energy production in the region and supplies drinking water to some of its main cities.

¹⁹ The authors of this section are Vincent Jomelli, Antoine Rabatel, Patrick Ginot, Vincent Favier, Delphine Grancher, Daniel Brunstein, Jesús Gómez, Abraham Machaca and Bolívar Cáceres.

4.2. Regional history of glacial fluctuations

In order to document the LIA in the Andes, scientists from the IRD (France), the University of San Andres (Bolivia), the National Institute of National Resources - INRENA (Peru) and the National Institute of Meteorology and Hydrology - INAMHI (Ecuador) carried out a study of 90 glaciers located in Bolivia, Ecuador and Peru (Rabatel et al., 2005, 2006, Jomelli et al., 2006a,b). The methods used to date the moraines were essentially based on lichenometry, in other words, calibration based on the time a certain species of lichens found on the blocks needs to grow (Jomelli et al., 2006a). Although lichenometry must be cross-referenced with other methods to provide definitive dates, it has been found that the conditions in the higher tropical Andes are very favorable to the study of the *Rhizocarpon Geographicum* species.

Processing field data has required devising a new statistical method (Naveau et al., 2006). Reconstructing the glaciers surfaces and volumes required using photogrammetric methods and topographic field surveying in a significant number of LIA moraine systems in particular in Bolivia (Rabatel et al., 2006). In addition, in Ecuador and Peru,

several historical archives, including paintings, drawings, or chronicles were used as documentary support to estimate the glaciers extension and dates (Francou, 2004).

The results of this study show evidence of the advance of the LIA in the Andean Tropics.

Moraines dating from the 14th century have been found at the base of glaciers between 4,100 and 4,300 masl located in the Cordillera Blanca in Peru and the Cordillera Real in Bolivia, suggesting the occurrence of a glacial advance during the first centuries of the last millennium. The moraines deposited before the 14th century are much older, meaning that the area of the glaciers may have shrunk at the beginning of the last millennium. However, in many glaciers the moraine phase of the 14th century is not present, as is the case with the Laca or de Kinzl glaciers in the Cordillera Blanca.

The phase of the 14th century has not been observed in either Ecuador or Bolivia, where it probably occurred but was covered up by the maximum advances of the 17th and 18th centuries.

4.2.1 Maximum extension of the LIA in the Central Andes

In Ecuador (between the parallels of 0°S and 6°S), the maximum extension of the LIA occurred in two periods. In glaciers located above 5,700 masl (volcanoes such as Chimborazo or Antizana), this occurred around 1730. In glaciers located on peaks lower than 5,400 masl, the maximum extension of the LIA occurred around 1830. Other measurements indicate that this last glacial advance also occurred in high-altitude peaks (Jomelli et al., 2006c).

Glacial advances were also recorded in two periods in Venezuela (Polissar et al., 2006). The first occurred between 1640 and 1730 and the second between 1800 and 1820.

In the outer tropics (between the 10°S and 16°S parallels), the maximum extension of the LIA occurred several decades earlier. In the Cordillera Blanca, this occurred around 1630. In Bolivia, the glaciers reached their maximum extension between 1657 and 1686 (Rabatel, 2005; Rabatel et al., 2005, 2006).

4.2.2 Glacier retreat between the 17th and 20th centuries

Since the maximum extension of the LIA, glaciers have evolved in a notably homogeneous manner. Retreat occurred slowly between the 18th and 19th centuries, but accelerated rapidly starting in 1840 (especially between 1880 and 1910).

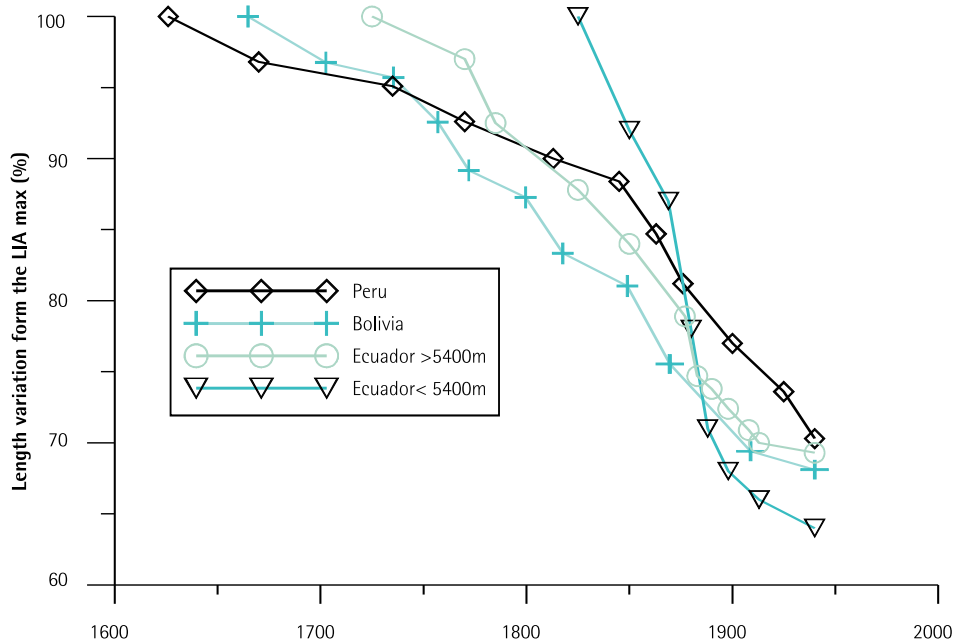
In Ecuador, two glacial advances were recorded immediately after the maximum extension of the LIA in seven glaciers situated on volcanoes at high altitude (approximately 1748 and 1786). The moraines located near what was the maximum extension of the glaciers allow the estimation of a slow retreat of between 7 and 15% of their total length during the 18th century.

Another important advance occurred around 1830, during which time glaciers located on low-altitude peaks advanced beyond the maximum point recorded in the 18th century. From that moment on, all glaciers located between 6,000 and 5,400 masl showed an identical pattern: a slight retreat toward the middle of the 19th century, and a strong one between 1870 and the beginning of the 20th century. Between 1830 and 1870, glaciers located at high altitudes lost 15% of their area, while those located at lower altitudes lost 18%.

From the beginning of the 20th century until 1950, the retreat was relatively moderate. High- and low-altitude glaciers lost 11 and 15%, respectively.

Figure 4.1

- Tropical Andes: Evolution since the maximum extension of the LIA -



Source: Francou and Vincent, 2007.

Glaciers located in the outer tropics showed the same pattern. After reaching their maximum extension in the second half of the 17th century, they retreated continuously during the 18th and 19th centuries, when only minor advances occurred (such as those of the 1730s and 1800s). It is important to mention that this continuous retreat occurred only in the Andean Tropics, while glaciers located in the northern hemisphere recorded advances between 1550 and 1880.

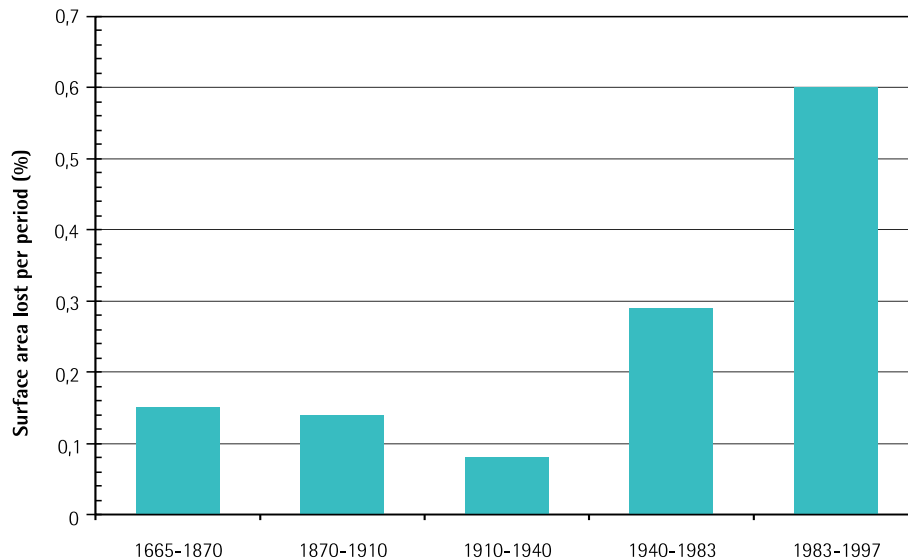
In Bolivia, Rabatel et al. (2006) observed that during the period between the middle of the 17th century and the end of the 19th century, all glaciers retreated around 1,000 m. Expressed in terms of annual averages for the different glaciers, the reduction in area was 0.15% per year between the maximum extension of the LIA and the end of the 19th century (Figure 4.2, below).

Peruvian and Bolivian glaciers lost around 15% of their area in the 18th century and about 19% in the 19th century. During the first decades of the 20th century, the glaciers located in the Cordillera Blanca and the Cordillera Real retreated slowly, with the exception of a significant advance in the 1920s. Another notable retreat occurred in the 1930s and 1940s (Kaser and Georges, 1997; Georges, 2004).

During the second half of the 20th century, the glacier retreat accelerated drastically. This retreat may be of the same magnitude as that which occurred between the maximum extension of the LIA and the middle of the 20th century.

Figure 4.2

- Evolution of the surface area of the Charquini glacier (Bolivia) -



Source: Rabatel (2005)

4.2.3 Compared evolution of glaciers during the LIA

Between the beginning of the LIA and the early 20th century, the majority of the advances and retreats that occurred in Andean glaciers also occurred in mountain chains located in the middle latitudes. Significant extensions of glaciers were observed in the European Alps and the Rocky Mountains of Canada in both the 14th century and the middle and end of the 17th century (Grove, 1988; Luckman, 2000; Le Roy Ladurie, 2004). During the first half of the 18th century, they also occurred in Scandinavia (Nesje and Dahl, 2000), Patagonia (Luckman and Villalba, 2001) and the Alps of southern New Zealand (Winkler, 2004). Advances were also recorded at the beginning of the 19th century in the Alps.

Parallels in various phases of glacier retreat were also recorded. During the second half of the 18th century, both

glaciers located in the Andean tropics as well as the Alps (Zumbühl and Holzhauser, 1988) and Scandinavian mountain chains (Nesje and Dahl, 2003) retreated progressively. Likewise, the increase in the speed of the retreat that occurred between 1860–1870 and the beginning of the 20th century coincides with similar processes throughout the world, particularly in the Alps (Grove, 1988).

Significant differences also exist, however. For example, the magnitude of the advances was clearly different between the different mountain massifs worldwide. On one hand, the maximum glacial advance did not occur at the same time in the different cordilleras of the Tropical Andes and the rest of the world. On the other, only one phase of maximum extension of the glaciers occurred in the Tropical Andes during the LIA from the 17th century on, while in the Alps, at least three glacial advances of the same magnitude occurred in the same period.

4.3 Climate conditions that may explain the evolution of tropical glaciers during the LIA

Various studies have shown that the interannual variability of the mass balance of tropical glaciers depends mainly on the variability of solid precipitation²⁰. This is due to the fact that a precipitation deficit translates to a reduction in the accumulation of snow, which favors the rapid formation of ice when the snow layer disappears.

Temperature variations also affect the mass balance through the phase (liquid/solid) of the precipitation. In effect, if the air temperature rises, so does the altitude at which precipitation converts from liquid into snow. This change of precipitation phase has more effect on glaciers closer to the equatorial line, such as those in Ecuador or Colombia, where they reach a lower average altitude, than glaciers close to the tropics, which are located at a higher average altitude.

The occurrence of rain over glaciers has an indirect effect, above all on the albedo. The slight quantity of water reaching the surface of the glaciers and its temperature, which is too low, do not contribute to a direct increase of ablation due to the contribution of heat.

The peak of the LIA in Peru and Bolivia occurred during a period known as the "Maunder minimum of insolation" (1645–1715), during which solar radiation was approximately 0.24% lower than at present, which generated a worldwide atmospheric chilling of approximately 1°C (Rind et al. 2004). This coincidence reinforces arguments on the relation

between solar activity and glacial expansion (Eddy, 1976). In the tropics, this relation may be more evident, since the radiative balance is one of the key factors in the behavior of tropical glaciers (Wagnon et al., 1999).

In Ecuador, slightly drier or warmer conditions in the middle of the 17th century in comparison to the 18th century may explain the different seasonality of the peak of the LIA when compared with Bolivia and Peru. During the LIA, the ELA was around 150 m less than today. For this reason, the lowest altitude at which glacial fronts were found (approximately 600 m) may have been the necessary consequence of a more intense accumulation process than is currently the case.

The hypothesis of an increase in precipitation is in line with other climate indicators. Various samples of ice extracted from snow-capped peaks located in the Tropical Andes suggest colder conditions during that time period (Thompson et al. 1985, 2006).

It may be concluded that the main reason for which a glacier retreat has been occurring since the second half of the 18th century is a gradual decrease in precipitation. The change toward drier conditions that has occurred since that time is evidenced in ice samples obtained in Bolivia and Peru (Thompson et al., 1985), in the analysis of pollen records in the region of Sajama (Bolivia) (Liu et al., 2005) and in the analysis of old lagoons levels (Chepstow-Lusty et al., 2003).

²⁰ Wagnon *et al.*, 1999; Francou *et al.*, 2003, 2004; Favier *et al.*, 2004a; Sicart *et al.*, 2005

Box 4.1

- Glaciers with moraines of the LIA (Ecuador) -

Glacier cirque from Caldera del Altar in Ecuador. In the upper picture, a 1903 watercolor from Rodolf Reschreiter shows the glacier surface covering the entire cirque. It can be noticed a glacier decrease from the lateral moraine deposit, corresponding to a maximum extension of the Little Ice Age (LIA).

The lower picture shows the same glacier cirque in 2001, where the glacier retreats toward the walls of the upper cirque. The estimated depth for the Yellow Lake is 50 meters. It is estimated that its glacier tongue in the XVII-XIX century had more than 100 meter depth over the place where it is currently placed.

© Private collection
© IRD- Bernard Francou



© IRD- Bernard Francou





¿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
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
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