

## ARTÍCULO INVITADO

# EL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL EN LA PATAGONIA DESDE EL VIAJE DE CHARLES DARWIN HASTA NUESTROS DÍAS

Jorge RABASSA

CADIC-CONICET, Ushuaia, Tierra del Fuego y Universidad Nacional de la Patagonia-San Juan Bosco, Sede Ushuaia. Email: jrabassa@gmail.com

## RESUMEN

El viaje del Beagle que trajo a Charles Darwin a América del Sur entre 1832 y 1835 AD y en particular, al territorio argentino, se desarrolló bajo condiciones climáticas muy desfavorables: frías, secas y ventosas, correspondientes a las condiciones predominantes en la última fase de la pequeña edad de hielo, un episodio frío global que caracterizó a los siglos XVII, XVIII y XIX. Esta fase es conocida como mínimo de Dalton, en referencia a la disminución relativa de la frecuencia de las manchas solares, lo cual redundó en una disminución de la radiación solar y como consecuencia, en menores temperaturas medias globales en ese período. Darwin fue perfectamente consciente de dichas condiciones climáticas, que se manifestaban fuertemente en Europa, en particular en los Alpes, y así lo transmite en sus escritos. Desde el viaje de Darwin a la Patagonia, las condiciones climáticas y ambientales cambiaron sustancialmente, especialmente luego de 1850 AD y, finalmente, después de mediados de la década de 1970 AD. Algunas de las más importantes consecuencias del cambio climático global son el aumento de la temperatura media anual o la temperatura estacional, la elevación o disminución de las precipitaciones al nivel regional, el continuo ascenso global del nivel del mar y un incremento significativo de la frecuencia de eventos meteorológicos extremos. El impacto de esos cambios ha sido observado en los glaciares de Patagonia y Tierra del Fuego, por lo menos desde 1978 AD, y particularmente en la última década del siglo XX. Los impactos más notables son la rápida recesión de los márgenes del hielo en los glaciares, el adelgazamiento de la cobertura glacial, la elevación de la línea de nieve regional y la reducción de las áreas andinas bajo condiciones de suelos permanentemente congelados (*permafrost*), como han demostrado estudios científicos recientes. A la tasa presente de recesión del hielo glacial, la mayoría, si no todos, los glaciares de circo de la Patagonia y Tierra del Fuego desaparecerán durante las próximas dos décadas, y tanto los glaciares de valle como los mantos de hielo de la Patagonia se verán severamente reducidos en su superficie y espesor. Como consecuencia de la desaparición paulatina de los glaciares, se esperan significativos cambios en las condiciones ambientales, hidrológicas, geomorfológicas, turísticas y del patrimonio natural de estas regiones, que afectarán severamente a aquellas comunidades que viven en ellas.

Palabras clave: *Calentamiento global, glaciares, pequeña edad de hielo, Patagonia, Tierra del Fuego.*

**ABSTRACT:** *The global climatic change in Patagonia and Tierra del Fuego since voyage of Charles Darwin until present times. The Voyage of the Beagle that brought Charles Darwin to South America in AD 1832- 1835 and particularly, to the present territory of Argentina, was developed under very unfavorable climatic conditions, much colder, drier and windier than today. These circumstances correspond to the dominant conditions during the last phase of the little ice age, which was a global, cold event that characterized the 17th to the 19th centuries. This phase is known as the Dalton Minimum, in reference to the relative small amount of solar spots, which generated a diminution of the solar radiation and in consequence, the lowering of the global mean temperatures in that period. Darwin was perfectly conscious of those climatic conditions, which were clearly shown in Europe at those times and particularly in the Alps, and therefore he is clearly showing that in his writings. Since Darwin's Voyage to Patagonia, the climatic and environmental conditions have changed substantially, particularly after AD 1850 and finally, after the middle portion of the AD 1970's decade. Some of the most important consequences of global climate change are rising mean annual or seasonal temperature, rising or diminishing precipitations at the regional level, rising global sea level, and an increase in the frequency of extreme meteorological events. The impact of these changes has been observed in the glaciers of Patagonia and Tierra del Fuego, at least since AD 1978 and, particularly, in the last decade of the 20th century. The most noticeable impacts are rapid recession of ice margins, thinning of the ice cover, raising elevation of the regional snow line and reduction of Andean areas under permafrost conditions, as recent scientific research has demonstrated. At the present rate of ice recession, most, if not all of the cirque glaciers in Patagonia and Tierra del Fuego will disappear during the next two decades, and both valley glaciers and the Patagonian ice sheets will be severely reduced as well. As a consequence of glaciers vanishing, environmental, hydrological, geomorphological, heritage and tourism damages are expected to occur in these regions and severely affect those communities active in them.*

Keywords: *Global warming, glaciers, little ice age, Patagonia, Tierra del Fuego.*

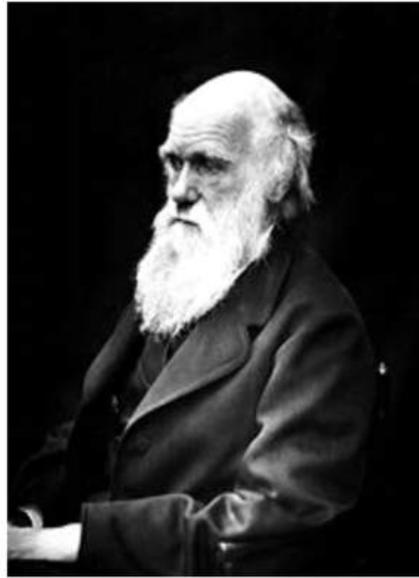
## INTRODUCCIÓN

La presente contribución es una versión abreviada de una conferencia desarrollada en setiembre de 2009 en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires, en el marco de la Cátedra Libre Pelegrino Strobel y en ocasión de la entrega del Premio Strobel al distinguido paleontólogo argentino, Prof. Dr. Rosendo Pascual.

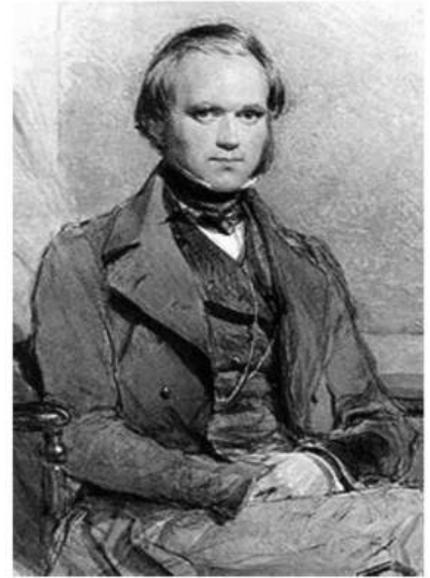
El objetivo del presente trabajo es aportar información acerca de las variaciones climáticas registradas en la región patagónica desde el viaje del H.M.S. Beagle a América del Sur, el cual tuvo lugar entre 1832 y 1835 AD hasta el presente. Se destaca además el impacto del cambio climático global sobre los glaciares patagónicos, durante el siglo XX y en particular desde mediados de la década de 1970 AD. En dicho buque, comandado por el Capitán Robert Fitz Roy, se desempeñaba el joven Charles Darwin como naturalista a bordo. Sea éste entonces un modesto y sincero homenaje a la figura extraordinaria de Charles Darwin, de cuyo nacimiento se cumplieron 200 años en 2009 (Fig.1a). El autor ha tratado algunos aspectos de este trabajo en otras contribuciones (Rabassa 2007a, 2007b, 2008, 2010).

## CHARLES DARWIN Y LAS CIENCIAS GEOLÓGICAS

Charles Darwin es reconocido mundialmente por sus contribuciones trascendentales a la biología y la antropología, al formular la teoría de la evolución biológica basada en el principio de la selección natural. Sin embargo, el análisis de su biografía y de sus contribuciones científicas demuestran que el joven Darwin, en la época de su viaje en el Beagle, estaba profundamente consustanciado de un espíritu naturalista que lo acercaba fuertemente a las ciencias geológicas, con las cuales ya se había vinculado durante sus estudios universitarios en Edinburg y Cambridge y en particular durante sus frecuentes excursiones al terreno y sus



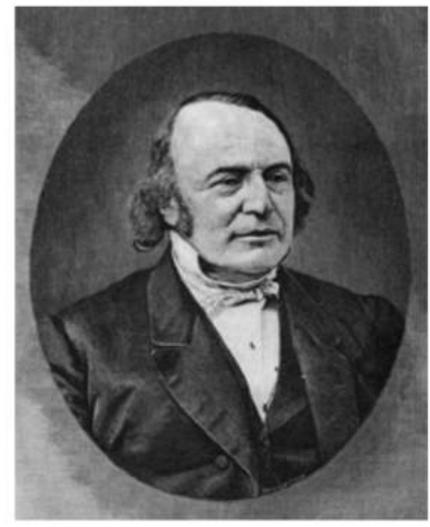
a



b



c



d

**Figura 1:** a) Charles Darwin, anciano; b) Darwin, joven, en la época del viaje del H.M.S. Beagle; c) Charles Lyell; d) Jean-Louis Agassiz.

extensas cabalgatas (Fig. 1b). Más aún, no sería arriesgado decir que en este momento de su vida, Darwin era, ante todo, un geólogo en ciernes, o por lo menos un destacado observador geológico en el campo. Curiosamente, sin embargo, en sus memorias (Darwin, 1946, p. 41) expresó que: “Durante mi segundo año en Edinburg seguí los cursos de geología y zoología de Jameson, pero eran increíblemente cansadores. El único efecto que me produjeron fue que tomé la determinación de no leer jamás un libro de geología ni estudiar nunca esa ciencia”. Pero en realidad,

sus sentimientos fueron otros, como él mismo lo reconocía: “En Cambridge se dictaban conferencias públicas...yo estaba tan harto de cursos ya desde Edinburg que no seguí ni aun el interesante y elocuente curso de Sedgwick. De haberlo hecho probablemente me hubiera convertido en geólogo mucho antes...” (Darwin 1946, p. 47). Ésta es casi una confesión: se hubiera convertido en geólogo “mucho antes”, del momento en que realmente lo fue. Es notable la influencia que tuvo sobre Darwin el insigne geólogo inglés de la

época, el Profesor Charles Lyell (1797-1875; Fig. 1c). El primer volumen del histórico libro de Lyell (1833) lo obtuvo Darwin antes de la partida viajando con él desde Inglaterra. El segundo volumen lo recibió, por correo, en Buenos Aires y ambos tomos fueron de permanente consulta a lo largo de todo el periplo global. A su regreso a Londres, Lyell lo recibió en forma muy entusiasta y al conocer sus observaciones sobre las condiciones de emersión de la costa de Chile, lo incitó a publicarlas (Darwin 1837a). Lyell, viendo sus notables condiciones, muy pronto lo impulsó como secretario de la *Geological Society of London*, posición que lo distinguió tempranamente ante sus colegas. Darwin se sintió siempre muy atraído por los glaciares. En sus memorias publicadas en 1946 (Darwin 1946, p. 57) dice que “El profesor Sedgwick pensaba visitar el norte del país de Gales... En *Cwm Idwal*... ninguno de los dos vio las señas de asombrosos fenómenos glaciares... no advertimos las rocas estriadas, los bloques erráticos, las morenas laterales y terminales... Si hubiera estado todavía ocupado por el glaciar, el fenómeno se habría mostrado con menos nitidez?”. Esta reflexión está claramente justificada pues, en su juventud y aún durante el famoso viaje, la teoría glacial de Jean Louis Agassiz (1807-1873; Fig. 1d) fue expresada recién en su histórico discurso de Neuchâtel (Agassiz 1840). Hasta entonces, el paradigma de la época preconizaba que los depósitos glaciares en realidad habían sido dejados por enormes témpanos que flotaban en las aguas del diluvio universal, y no por glaciares que descendían de sus zonas de acumulación en las montañas como Agassiz proponía. De haber conocido antes las ideas de Agassiz, Darwin hubiera podido resolver sin dificultades algunos de los problemas geológicos y geomorfológicos que lo obsesionaron durante sus viajes en Patagonia: la naturaleza de los bloques erráticos, el enigma de los Rodados Patagónicos (unidad que él mismo definió por primera vez como la *Patagonian Shingle Formation*), o las geofomas glaciogénicas en las zonas bajas del valle del río Santa Cruz, a las cuales se refirió en lo que fue-

ra el primer trabajo científico moderno sobre el Cuaternario patagónico, publicado formalmente (Darwin 1841a).

En realidad, en esta época temprana de su vida Darwin era efectivamente un naturalista, cuyo principal interés era la geología. La lectura de sus notas y el listado de sus publicaciones lo demuestran claramente. Darwin publicó 19 obras geológicas de trascendencia entre 1835 y 1855 (Darwin 1835, 1837a, b, c, d, 1838, 1839a, b, 1841a, b, 1842, 1844a, b, c, 1846a, b, c, 1848, 1849, 1855; véase Barrett 1977). En su sorprendente trabajo de 1838, Darwin esboza algunas ideas que parecen preanunciar los conceptos de la tectónica de placas. Obsérvese además que por lo menos 14 de estas obras tratan temas de geomorfología, glaciología y geología del Cuaternario.

La labor geológica y paleontológica de Darwin en la región pampeana (*On the formation of the Pampas*, Darwin 1876, p. 313) y en Patagonia fue muy destacada. Esto lo demuestran sus estudios de campo en Bahía Blanca, Puerto Deseado, el valle del Río Santa Cruz, el estrecho de Magallanes y Tierra del Fuego, además de múltiples observaciones sobre los Rodados Patagónicos en diferentes localidades, bajo el nombre de *Gravel Formation of Patagonia* (Darwin 1876).

## EL CLIMA DURANTE EL VIAJE DEL BEAGLE

En su libro del viaje (Darwin 1846b, 1876), el capítulo 11 trata sobre el clima de las costas meridionales, en el cual se destaca que el clima a lo largo del viaje patagónico fue muy frío y lluvioso, sobre todo en Tierra del Fuego, y con tremendas sequías en la región pampeana. Esta circunstancia le permitió a Darwin tener acceso a los cauces secos de ríos y arroyos, donde realizó notables observaciones y colecciones de restos fósiles, sobre todo megamamíferos. En el mismo sentido, Darwin destaca que los canales fueguinos estaban llenos de témpanos, ya que por ese entonces la mayoría de los glaciares del sector occidental del Canal Beagle llega-

ban hasta el nivel del mar donde se producía *calving*, es decir, formación de témpanos al ingresar un glaciar a un cuerpo de agua.

Estas observaciones de Darwin son coherentes con lo que se conoce acerca del clima del Holoceno tardío a nivel global. Luego del Último Máximo Glacial (UMG, ca. 24 ka A.P.), tuvo lugar un brusco calentamiento al comienzo del Tardiglacial (es decir, entre 15 y 10 <sup>14</sup>C ka A.P.), que fue seguido por un violento enfriamiento que se denomina *Younger Dryas* en la nomenclatura del Océano Atlántico Norte, el cual se mantuvo durante poco más de un milenio. Este evento, si bien de origen local y vinculado a la deglaciación del Manto Lauréntico en Canadá, tuvo repercusión global. Una vez finalizado este evento, el mejoramiento climático se acentuó y consolida a través de todo el Holoceno. Se observan, asimismo, diversas fluctuaciones climáticas a lo largo de este último período, que dieron origen a las denominadas neoglaciaciones (reavances recientes de los glaciares; Mercer, 1976), intercaladas con episodios de mejoramiento climático, de los cuales podemos destacar el llamado Hipsitermal u óptimo climático holoceno (ca. 7,5-5,0 ka A.P.) y más recientemente, el denominado óptimo medieval, que se desarrolló entre los años 900 y 1400 AD. Finalmente, el último enfriamiento global se produjo entre los siglos XV y XIX de nuestra era, al cual se lo ha llamado pequeña edad de hielo, cuyos impactos fueron especialmente notables en Europa. Precisamente, el viaje del Beagle tuvo lugar durante el momento de mayor intensidad de la última fase de esta pequeña edad de hielo.

## NEOGLACIACIONES PATAGÓNICAS

Mercer (1976), y en otros trabajos allí citados, publicó estudios pioneros sobre las neoglaciaciones de Patagonia y sugirió que luego de los avances del Tardiglacial, los glaciares no habrían reavanzado hasta aproximadamente 5 <sup>14</sup>C ka AP. El primero de estos reavances tuvo lugar ca. 4,7-

4,2  $^{14}\text{C}$  ka A.P., el segundo hacia 2,7-2,0  $^{14}\text{C}$  ka A.P. y el tercero durante los últimos siglos. Estas edades se aproximan mucho a aquellos valores determinados en otros lugares de los Andes y en el hemisferio norte (Clapperton 1993). Asimismo, Porter (2000) discutió extensivamente la naturaleza y edad de las glaciaciones patagónicas holocenas (véase síntesis en Rabassa 2008).

Los estudios palinológicos en el distrito lacustre chileno (véase síntesis en Heusser 2003) indican también la existencia de tres eventos de enfriamiento durante los últimos cinco milenios. Los intervalos de temperatura relativamente baja parecen haber coincidido con periodos de precipitación mucho más alta que la presente, hasta 150 % por encima del promedio actual (Heusser y Streeter 1980).

## LA PEQUEÑA EDAD DE HIELO

### Episodio frío de los siglos XV a XIX

El denominado diagrama de Mann (Mann y Bradley 1999, Fig.2) resume múltiples fuentes de información de paleotemperaturas, tanto instrumentales como a partir de elementos *proxy*, para el último milenio en el hemisferio norte. Se reconocen allí, en primer lugar, una época de mayores temperaturas relativas, el óptimo medieval y luego, una época de menores temperaturas, la llamada pequeña edad de hielo. Se ha indicado sobre la figura el momento del viaje del Beagle. Poco antes de esa fecha se identifica un notable pico de baja temperatura en el año 1816 AD, que fuera denominado “el año sin verano” en Europa, como consecuencia del efecto pantalla de las cenizas eyectadas a la atmósfera superior por el volcán Tambora, en Indonesia, el año previo. Es en esta época cuando desaparece la producción de vinos en el sur de Inglaterra, cuyos viñedos habían sido cultivados desde el óptimo medieval, como consecuencia del fuerte enfriamiento regional (Uriarte Cantolla 2003, p. 138).

Fue Mercer (1976), entre otros trabajos (véase Rabassa 2008), quien identificó

por primera vez la existencia de morenas frontales y laterales en los glaciares de Patagonia, cuya última expansión de importancia se produjo entre 1750 y 1850 AD y que denominó la pequeña edad de hielo, siguiendo la nomenclatura de los Alpes, donde el impacto de estos avances había sido muy intenso, arrasando pueblos de alta montaña que se habían establecido durante el óptimo medieval. El máximo de la pequeña edad de hielo se habría producido en  $1760 \pm 10$  AD.

Se han discutido extensamente las causas de este enfriamiento intenso y del calentamiento global subsecuente. El episodio de enfriamiento ha sido vinculado con la variabilidad de las manchas solares en los últimos 400 años. Un aumento de la frecuencia de las manchas solares implica un aumento de la radiación solar y, con ello, un aumento de la energía solar recibida en la superficie planetaria. Una disminución de las manchas solares provocará exactamente el efecto contrario y un consecuente enfriamiento (Uriarte Cantolla 2003, y trabajos allí citados). En la figura 3 se ha representado la frecuencia de manchas solares para los últimos 450 años, y se ha identificado la presencia de mínimos muy claros en la frecuencia de dichas manchas.

Los isótopos cosmogénicos, tales como el carbono 14 ( $^{14}\text{C}$ ) y el berilio 10 ( $^{10}\text{Be}$ ), son *proxies* adecuados para identificar las variaciones en la frecuencia de las manchas solares y, por ende, de la temperatura global. Los isótopos cosmogénicos se generan por la acción de la radiación cósmica sobre átomos de la atmósfera o la litósfera (véase, por ejemplo, Kaplan *et al.* 2007). La menor intensidad de la radiación solar permite el ingreso de mayor radiación cósmica, por ello a mayor frecuencia de manchas solares, menor radiación cósmica y menor concentración de isótopos cosmogénicos, y viceversa.

Basado en estudios dendrocronológicos (Eddy 1976), se ha reconocido asimismo la concentración atmosférica de  $^{14}\text{C}$  para el mismo periodo. El  $^{14}\text{C}$  es un isótopo generado por el impacto de neutrones cósmicos sobre átomos de  $^{14}\text{N}$  en la at-

mósfera (Uriarte Cantolla 2003). Por lo tanto, valores negativos en la desviación del contenido de  $^{14}\text{C}$  en el aire con relación a la actualidad, se interpretan como proxy de la frecuencia de manchas solares observadas, las cuales se indican también en este diagrama. Momentos más cálidos tuvieron lugar hacia 1400 y 1600 AD, los cuales aparecen intercalados con episodios de mínima radiación denominados mínimo de Sporer (ca. 1500 AD), mínimo de Maunder (ca. 1645-1715 AD) y mínimo de Dalton (ca. 1800-1840 AD). Fue el mínimo de Maunder el que generó la máxima expansión de los hielos en Patagonia norte, hacia mediados del siglo XVII, lo cual ha sido establecido por medio de estudios dendrocronológicos en las morenas de esta edad (Rabassa *et al.* 1984, Bertani *et al.* 1986, Brandani *et al.* 1986, Rabassa 2008, Masiokas *et al.* 2009), pero el viaje del Beagle tuvo lugar durante el mínimo de Dalton. El mismo comportamiento se ha observado con respecto a la variación del  $^{10}\text{Be}$  en relación con las manchas solares, demostrándose así, por medio de una variable independiente, la influencia de su frecuencia sobre el clima planetario.

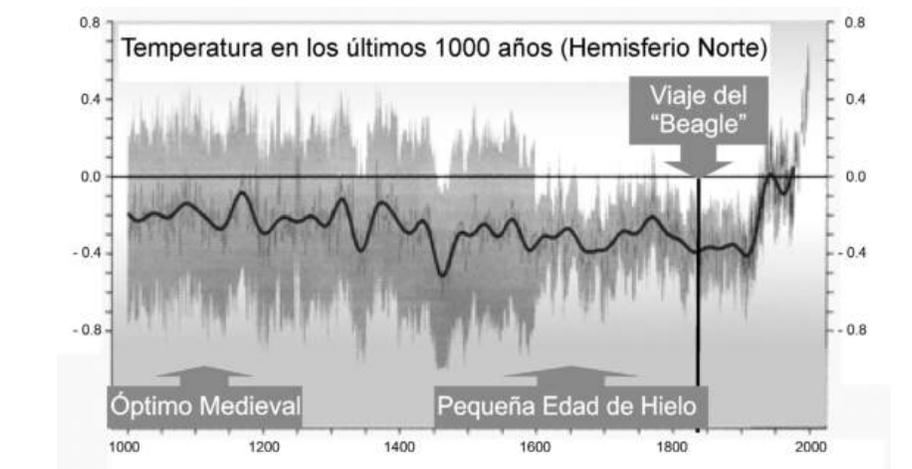
## AUMENTO DE LA TEMPERATURA GLOBAL LUEGO DEL FIN DE LA PEQUEÑA EDAD DE HIELO

### El cambio climático global

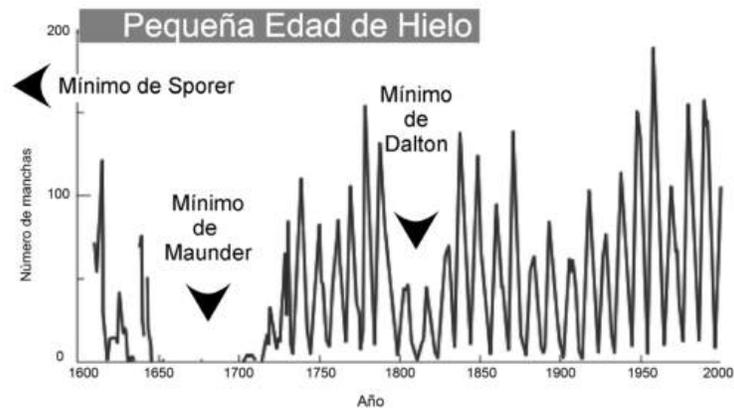
La temperatura global aumentó sensiblemente al terminar la pequeña edad de hielo. Al culminar hacia 1850 AD, se produce un aumento de la temperatura global de 0,5-0,7 °C en los últimos 150 años. Pero en la banda latitudinal meridional entre 44° y 64° S, este aumento ha sido mayor, 0,9 °C  $\pm$  0,3 °C entre 1880 a 1980 AD (Fig. 4; IPCC 2007). Esta figura representa la desviación de las temperaturas medias en relación al promedio de las temperaturas globales del período 1961-1990. Obsérvese que el aumento de la temperatura global se incrementa exponencialmente a medida que se desarrolla el siglo 20, como ya se había indicado en

el Diagrama de Mann-Bradley (Fig. 2). El cambio global se expresa en forma evidente en esta figura: la tasa de incremento de la temperatura global fue en los últimos 25 años cuatro veces mayor que el promedio de los últimos 150 años. Se refiere al lector a las publicaciones del *International Panel for Climatic Change* (IPCC; www.ipcc.ch) para consultar la documentación pertinente. Este panel es el órgano oficial de las Naciones Unidas en esta temática y está compuesto por cientos de destacados especialistas de todos los países del mundo, entre ellos, varios argentinos. En este trabajo se acepta la opinión oficial del panel, si bien se reconoce que se han expresado opiniones divergentes por parte de los denominados “escépticos” quienes niegan la existencia del cambio climático global.

El cambio global se manifiesta a través del aumento de la temperatura media anual o estacional, aumento o disminución regional de las precipitaciones y aumento en la frecuencia de eventos meteorológicos extremos. Los impactos, tanto benéficos como perjudiciales, del cambio climático en Patagonia y Tierra del Fuego se han manifestado con mayor intensidad a partir de 1978 AD, y en particular, en la última década del siglo XX. Estas regiones se caracterizan por su alta vulnerabilidad, derivada de su posición latitudinal en el hemisferio sur, sus climas extremos y de alta variabilidad intrínseca, y su ubicación geográfica con respecto a los océanos australes y a la corriente circumpolar antártica. Esta alta variabilidad climática se ha manifestado asimismo a lo largo de todo el Pleistoceno tardío, en particular desde el Tardiglacial (15.000-10.000 años atrás), y a lo largo del Holoceno hasta nuestros días. Los impactos negativos del cambio climático son muy claros y frecuentes, tales como la pérdida de biodiversidad y de masa forestal en el ecotono bosque-estepa, la mayor frecuencia de eventos hidrológicos extremos (inundaciones y sequías), la desaparición parcial o total del permafrost sobre la línea del bosque, la desecación de turberas y humedales, el ascenso del nivel



**Figura 2:** Diagrama de Mann-Bradley (en IPCC 2007): variación de la temperatura global para los últimos 1000 años, sobre datos del Hemisferio Norte. Eje horizontal, años AD. Eje vertical, desviación de la temperatura con respecto al promedio del período 1961-1990. La línea vertical muestra el momento del viaje del H.M.S. Beagle. Obsérvese el crecimiento exponencial de la temperatura en la segunda mitad del siglo XX. La línea central es el promedio de los datos paleoclimáticos utilizados. La banda gris a ambos lados del promedio estimado representa los intervalos de confianza al 95% de los métodos utilizados.



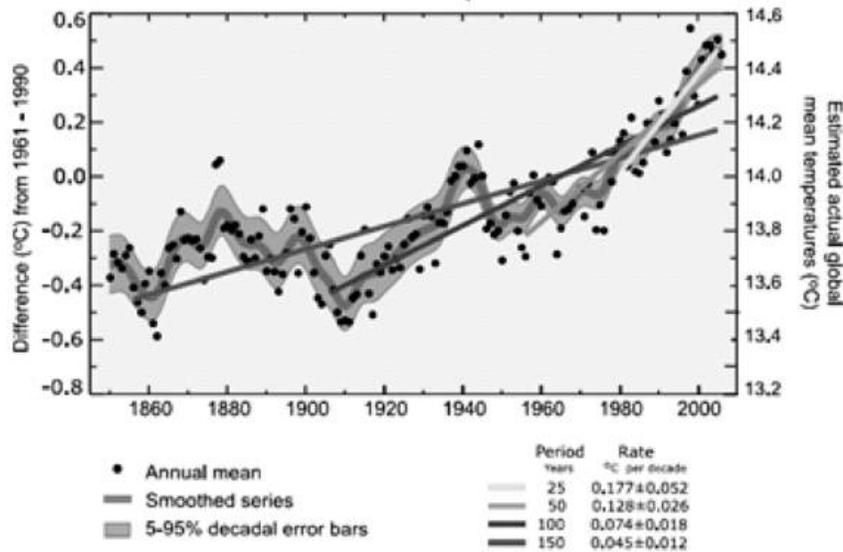
**Figura 3:** Frecuencia de manchas solares durante los últimos 400 años. Modificado de Uriarte Cantolla (2003). Eje horizontal, años AD. Eje vertical, número de manchas solares observadas. La Pequeña Edad de Hielo (PEH) se inicia antes del período indicado, con el mínimo de Sporer, que tuvo lugar en los siglos XV y XVI. Los denominados mínimos de Maunder y Dalton representan épocas más frías en la PEH, como consecuencia de ausencia relativa de manchas solares. El viaje del H.M.S. Beagle se desarrolló durante el mínimo de Dalton.

del mar e incremento de eventos erosivos costeros, el ascenso de la línea de nieve climática y el retroceso de los glaciares y desaparición de los neveros, entre muchos otros. Los glaciares son altamente sensibles al cambio climático, pues dependen de la temperatura media anual, las temperaturas extremas de verano, la precipitación nival total y la posición de la línea de nieves permanentes en relación al cuerpo de hielo. En este último caso en particular, el aumento de la temperatura media anual y, en especial, la elevada temperatura media del verano han

provocado una recesión generalizada de los glaciares patagónicos y fueguinos.

## EL EFECTO INVERNADERO

Cuando se discute el cambio climático global, en realidad debe considerarse la variabilidad climática natural junto a la perturbación antropogénica de la atmósfera, tanto en la atmósfera inferior o tropósfera como en la estratósfera. El Sol es la fuente esencial de calor para la superficie terrestre. La atmósfera contiene ciertas moléculas gaseosas que retienen una por-



**Figura 4:** aumento de la temperatura media anual global luego del fin de la pequeña edad de hielo, según IPCC (2007). Se ha respetado el texto de la figura original. Eje horizontal, años AD. Eje vertical, en el sector izquierdo, desviación de la temperatura anual global del promedio del período 1961-1990; en el sector derecho, temperaturas medias globales reales, estimadas. Círculos negros representan los promedios anuales respectivos. La banda gris representa los intervalos de confianza de 5-95% de los datos utilizados. La línea más oscura en la banda gris es el promedio suavizado de la serie. Las sucesivas líneas rectas representan las regresiones respectivas para los períodos de los últimos 150, 100, 50 y 25 años, las cuales tienen pendientes crecientes, demostrando la aceleración del proceso de calentamiento. Los valores indicados muestran la tasa de incremento de la temperatura, en grados centígrados por década.

ción de la energía solar ingresante, antes de irradiarla nuevamente al espacio exterior. Este mecanismo se conoce como efecto invernadero (*greenhouse effect*) y las sustancias que lo provocan, gases de invernadero. Este efecto causa temperaturas globales más elevadas que aquellas que le corresponderían de acuerdo a la distancia real de la Tierra al Sol. Si no fuera por este mecanismo, nuestro planeta sería mucho más frío de lo que es, con mantos de hielo continentales extensos y permanentes, que descenderían de los polos hacia latitudes muy bajas. El efecto invernadero de la Tierra, el cual ha estado activo por lo menos desde el Arqueozoico (>3.600 millones de años atrás), ha tenido una gran influencia en la aparición y desarrollo de la vida en nuestro planeta, pues ha permitido la existencia de los océanos y ha afectado la evolución de los organismos terrestres, tanto plantas como animales. El efecto invernadero suave pero eficiente de la Tierra contrasta con el tremendo efecto que se genera en Venus, donde la espesa atmósfera mantiene una superficie en temperaturas de

ebullición donde no hay agua líquida presente. El efecto invernadero está casi totalmente ausente en Marte, donde la atmósfera virtualmente desapareció en el pasado, no existiendo este efecto en la actualidad.

La variabilidad climática ha sido también muy significativa en las regiones estudiadas durante el Cuaternario (los últimos 2,5 Ma), debido a modificaciones de ciertos parámetros de la órbita terrestre, tales como su excentricidad, oblicuidad del eje terrestre y precesión equinoccial. Estas modificaciones regulares de la órbita se conocen como los ciclos de Milankovitch, por un astrónomo y climatólogo serbio de ese nombre, quien predijo dichos cambios al comienzo del siglo XX (Milankovitch 1920).

Las variaciones han tenido relevancia particular para la humanidad durante el Pleistoceno tardío (120 a 15 ka A.P.), el Tardiglacial (15-10 ka <sup>14</sup>C A.P.), y a través de todo el Holoceno (los últimos 10 ka <sup>14</sup>C A.P.) hasta la actualidad.

La concentración del CO<sub>2</sub> atmosférico ha variado en forma significativa durante

la historia de la Tierra, estando relacionada a los cambios en la extensión de las superficies continentales y los ecosistemas terrestres, a la órbita terrestre, al clima global, y a las temperaturas de los océanos y a las erupciones volcánicas. Pero la actividad humana no había generado cambios en gran escala hasta tiempos recientes, con quizás la única excepción del desarrollo agropecuario en el Holoceno más temprano, cuando creció muy fuertemente la población durante la revolución agrícola (Ruddiman 2005). Los registros instrumentales que muestran el incremento de CO<sub>2</sub> debido al uso de combustibles fósiles pertenecen únicamente al último siglo. La variabilidad climática natural de la Tierra se superpone ahora con las modificaciones inducidas por los humanos, particularmente desde la segunda revolución industrial, aproximadamente hacia 1850 AD. Durante los mínimos de radiación solar total recibida en la superficie de la Tierra, las bajas temperaturas fueron dominantes y generaron la pequeña edad de hielo. Luego de 1840 AD, la actividad solar retornó a sus condiciones normales, con el ciclo usual de 11 años. Desde 1850 AD y en el siglo XX, la temperatura global se incrementó en forma constante. Sin embargo, cortos períodos de enfriamiento alrededor de 1910, 1945 y 1970 AD causaron que los glaciares de todo el mundo avanzaran levemente en las décadas de 1940 y de 1970. El último año de avance glaciar generalizado en los Alpes suizos fue en 1977 AD, mientras que el último avance de los glaciares de Patagonia norte tuvo lugar en 1978 AD (Rabassa 2008). Los glaciares han estado en retroceso generalizado desde entonces. Desde esta fecha, las emisiones de CO<sub>2</sub> y otros gases de invernadero se han aumentado debido al uso de los combustibles fósiles, al desarrollo extensivo de agricultura y ganadería y a la reducción de las áreas forestales y otras porciones del paisaje cubiertas por ecosistemas vegetales, las cuales actúan como sumideros naturales del excedente de CO<sub>2</sub>. La información proporcionada por el panel de cambio climático muestra que la

influencia humana sobre la composición atmosférica es enorme, no sólo en cuanto al contenido de CO<sub>2</sub>, sino también en lo que concierne a metano y óxido nitroso. Los gases de invernadero en la atmósfera han incrementado dramáticamente su abundancia luego de 1850 AD, alcanzando concentraciones que no han sido nunca alcanzadas previamente en la historia de la humanidad, como lo muestran las mediciones realizadas en testigos del hielo de Groenlandia y Antártida. Estos gases, tanto de carácter natural como antropogénico, tienen un gran EI debido a su tamaño molecular relativamente elevado, a sus propiedades físico químicas y a sus concentraciones atmosféricas. Otros gases son también importantes, tales como el ozono troposférico y los halocarbonos artificiales (los llamados CFCs). Toda la información aquí presentada ha sido extensamente discutida por el panel internacional (IPCC 2007). El CO<sub>2</sub> es el más importante de los gases de invernadero, aunque su concentración total en la atmósfera es de menos del 1%. La presente concentración de CO<sub>2</sub>, cercana a 380 ppm, es la mayor de cualquier contenido, documentado por cualquier medio, de los últimos 20 millones de años, desde el Mioceno medio y antes que la orogenia andino-alpina modificara el clima global. Esta concentración se alcanzó con un aumento de sólo 30% con respecto al contenido atmosférico de los últimos 1000 años. La creciente concentración de CO<sub>2</sub> ha sido acompañada por un brusco incremento en la temperatura media global, alcanzando un máximo histórico en 1998 y 2003 AD, los años más cálidos del último milenio (IPCC 2007).

En años recientes, la temperatura media anual global se ha incrementado en forma considerable, con la excepción de 1992 AD, luego de la erupción del volcán Pinatubo en las islas Filipinas (Uriarte Cantolla 2003). Este último envió enormes cantidades de ceniza volcánica y gases a la estratosfera, bloqueando de esta manera la radiación solar ingresante y enfriando la atmósfera. Es el mismo proceso que ya se había indicado anteriormente para

el volcán Tambora en el año 1816 AD.

En términos regionales, las temperaturas invernales de los últimos 50 años se han incrementado en las regiones árticas y subárticas, y en la Península Antártica, con la excepción de sectores de Labrador y Groenlandia. Las temperaturas de verano han aumentado, particularmente en la Península Antártica, el noreste de África y el mar Mediterráneo.

El impacto del cambio global puede ser tanto dañino como benéfico, social como económicamente, en términos humanos, dependiendo de las diferentes áreas geográficas involucradas o del tipo de actividades humanas consideradas. Por ejemplo, entre los efectos benéficos del cambio global para América del Sur se encuentra el desplazamiento hacia climas benignos en las áreas australes y la ampliación hacia el sudoeste de la frontera agrícola en las Pampas argentinas. Sin embargo, los efectos negativos son mucho más claros y fuertes, tales como la pérdida de biodiversidad y masa forestal, la degradación de las franjas ecotonales, la frecuencia más alta de los eventos hidrológicos extremos tales como inundaciones y sequías, la reducción o aún, desaparición de las condiciones de permafrost en los Andes por encima de la línea de bosque, la desecación de los ecosistemas de humedales y turbales, la elevación de la línea de nieve climática y la rápida recesión de los glaciares y neveros de montaña (IPCC 2007).

El panel internacional ha estudiado estos impactos y su distribución regional (IPCC 2007) y preparado modelos que predicen las condiciones climáticas y ambientales a nivel global y regional esperables para el resto del siglo XXI. Estos modelos matemáticos probabilísticos han sido preparados basados en una gran variedad de escenarios tentativos, globales y regionales, de acuerdo al posible desarrollo social, tecnológico, cultural y económico de la humanidad. Cada escenario toma en consideración las variables culturales, políticas y tecnológicas que podrían expandir, mantener o reducir la emisión de gases de invernadero en el futuro. Los modelos

predicen las posibles consecuencias para el clima regional y global, y su influencia sobre los ecosistemas, agroecosistemas y sociedades. Una vez que esas consecuencias han sido identificadas, se proponen los procesos de adaptación y/o mitigación recomendables, para conocimiento de los gobiernos y organizaciones internacionales.

El impacto del cambio climático global es mayor donde la vulnerabilidad regional es más elevada. Estas condiciones son particularmente significativas para América latina y las zonas polares (IPCC 2007). En lo que respecta a este trabajo, el panel internacional opina que la pérdida de volumen de los glaciares y recesión de sus frentes en América latina impactará negativamente sobre el escurrimiento superficial disponible, en especial de aguas de alta calidad y pureza, en aquellas áreas donde la fusión glacial es una importante fuente de agua potable. Asimismo, se indica que las zonas polares (IPCC 2007) se encontrarán entre aquellas que sufrirán los impactos mayores y más fuertes, particularmente en la Península Antártica y los mares australes. Así, los cambios en el clima provocarán una menor extensión y espesor del hielo marino, mayor fusión del *permafrost*, variaciones en los mantos y plataformas de hielo y en la distribución de las especies cuyo hábitat se relaciona con el hielo.

Si una porción significativa de las aguas de fusión de los hielos antárticos llega al océano, el nivel del mar subirá significativamente. El manto de hielo de la Antártida occidental contiene agua suficiente por sí solo para elevar el nivel del océano en 5 m. Una elevación del nivel del mar de sólo 1 m implicaría una inversión de más de 10 billones de dólares estadounidenses a Holanda para defender sus costas y llanuras costeras (IPCC 2007). De la misma manera, el costo de la elevación del nivel del mar en Bangladesh podría ser medido en miles de vidas de los millones que habitan las fértiles tierras deltaicas y costeras, por pérdida de cosechas, poblados y contaminación de fuentes de agua potable (IPCC 2007).

## EL CLIMA DEL SIGLO XXI Y SU IMPACTO SOBRE LOS GLACIARES

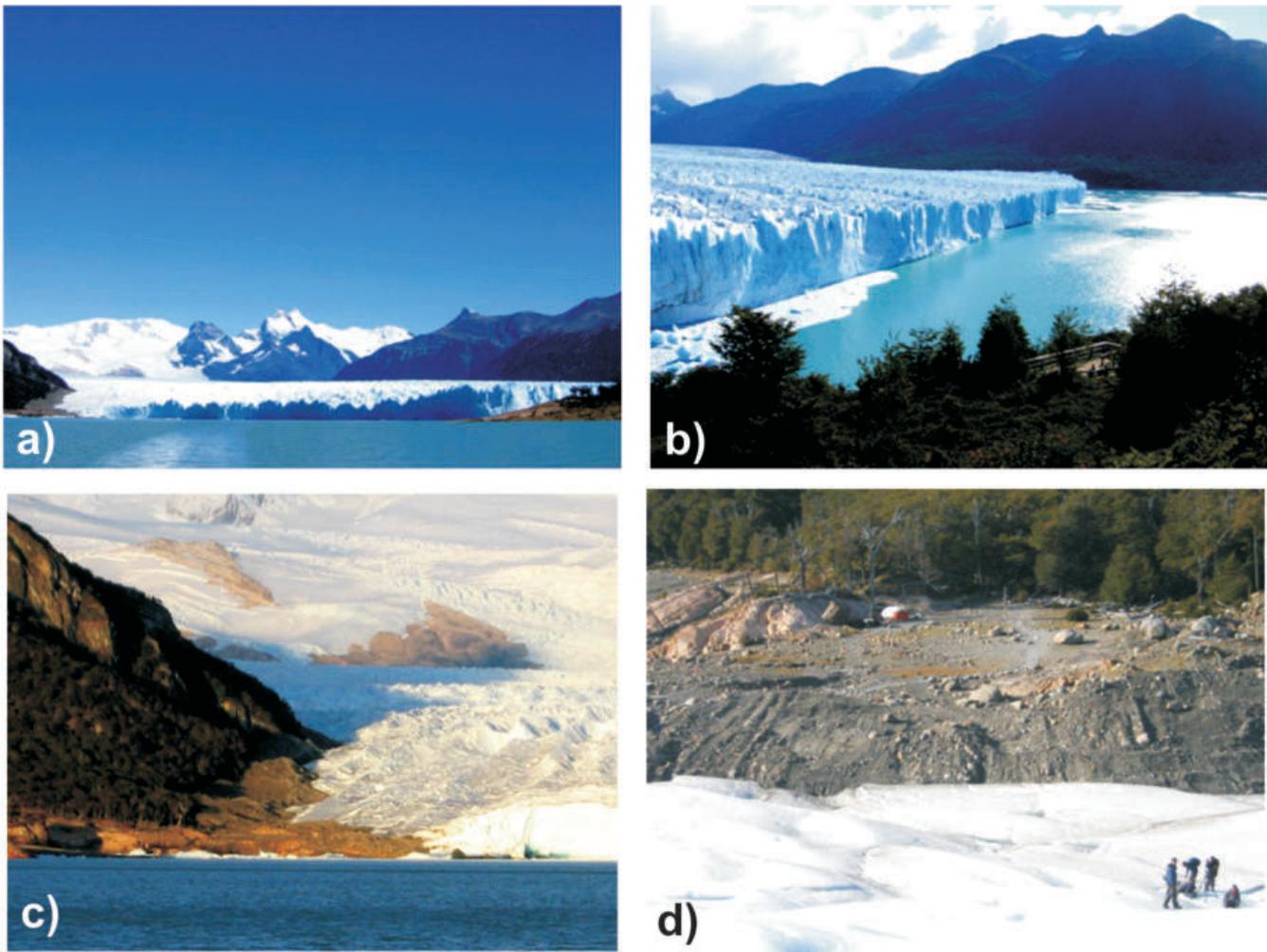
De acuerdo al IPCC (2007), el clima del siglo XXI será caracterizado por el incremento de las temperaturas medias anuales globales y, como consecuencia de ello, por un aumento lento pero continuo del nivel del mar. La temperatura media anual en 2100 AD se incrementará entre un mínimo de 1,4 °C y un máximo de 5,8 °C, por encima de las condiciones de 1990 AD, incluyendo en esas cifras los errores estadísticos de los métodos de evaluación utilizados. Este aumento de la temperatura impulsaría un aumento del nivel del mar global entre 0,2 m y 0,7 m. Un análisis probabilístico de las condiciones estudiadas indica que el nivel de confianza inferior (95%) está ubicado en 0,9 °C mientras que el superior (95%) es de 4,8 °C (revista *The Economist*, Abril 7, 2001, p. 74, Londres), con una mediana de 2,5 °C y una probabilidad máxima en 2,0 °C. Aun estos valores medios son muy importantes en términos de la variabilidad de la temperatura media anual, un parámetro climático muy estable de reconocida predictabilidad. Un aumento similar en latitudes templadas durante el período Hipótermal (ca. 8000-6000 años <sup>14</sup>C A.P., Holoceno medio) se considera como responsable de la transgresión global flandriana, de la inundación de las áreas costeras en todo el mundo y del desarrollo del mito del diluvio universal en muchas culturas (Uriarte Cantolla 2003). Hoy existen muchas pruebas del cambio climático activo: la elevación de la temperatura y la elevación del nivel del mar en todas las latitudes. Además de los registros instrumentales, uno de los ejemplos más dramáticos del impacto del cambio global es su efecto sobre los glaciares y el hielo marino.

## LOS GLACIARES DE LA PATAGONIA Y TIERRA DEL FUEGO

La línea de nieve regional se define como la elevación más baja en el paisaje (parti-

cularmente, el paisaje de montaña) que aparece cubierta con nieve que se acumuló durante el invierno anterior, al final de la época de fusión (usualmente el comienzo del otoño). La línea de equilibrio es su posición sobre la superficie de un determinado glaciar de base templada. En el caso de Patagonia y la Península Antártica, el incremento de las temperaturas medias anuales, particularmente las temperaturas del verano, ha tenido efectos reconocibles sobre la posición de la línea de nieve regional y por ende, de la línea de equilibrio, forzando su elevación por más de 200 m durante los últimos 20 años en Patagonia y Tierra del Fuego, y quizás hasta 100 m en algunas áreas de la Península Antártica (Rabassa 2010). Esto provocó una recesión generalizada de la mayoría de los glaciares patagónicos y fueguinos, fundamentalmente debido a la pérdida de área de acumulación, a la elevación de las temperaturas a la cota del hocico del glaciar y al incremento de *calving* en lagos o en el mar. La recesión general de los glaciares patagónicos ha sido observada por Aniya y Enomoto (1986), cuando estos investigadores detectaron, entre 1944 y 1984, una recesión máxima de aproximadamente 2,5 km en dos glaciares en *calving*. De la misma manera, la superficie de algunos glaciares disminuyó de 40 a 120 m durante los últimos 40 años. En un trabajo más reciente, Aniya (1999) estimó que los glaciares patagónicos contribuyeron por fusión creciente al ascenso del nivel del mar con  $1,93 \pm 0,75$  mm durante los últimos 50 años, lo cual equivale al 3,6% del total del cambio de nivel del mar. El análisis de los datos climáticos de estaciones meteorológicas, ubicadas en las cercanías del manto de hielo patagónico, reveló un ligero aumento de la temperatura del aire y una disminución de la precipitación durante los últimos 40 a 50 años (Aniya 1999). El famoso glaciar Perito Moreno (Parque Nacional Glaciares, provincia de Santa Cruz), es un caso particular, pues continúa avanzando activamente año tras año, bloqueando el brazo Rico, una rama del lago Argentino (Fig. 5a), y generando una pared de hielo que

luego colapsa cuando la presión hídrica acumulada en el sector sur de la pared excede la resistencia del hielo (Fig. 5b). Cuando la pared de hielo se rompe, se transforma en un sorprendente evento, el cual es apreciado por numerosos turistas y naturalistas de todo el mundo que concurren a ver este suceso, que ocurre en períodos irregulares, generalmente de más de un año. Este comportamiento anómalo no está probablemente relacionado a factores climáticos, sino a características glaciológicas internas o quizás a eventos sísmicos de baja magnitud, pequeños y recurrentes, aunque lo suficientemente grandes como para inducir el desplazamiento del hielo. Otros autores han asignado su comportamiento a una vinculación directa con eventos ENSO (El Niño *Southern Oscillation*; Depetris y Pasquini 2000). Sin embargo, el sector sur del glaciar está sufriendo un claro retroceso de su frente lateral y de su espesor, según fuera indicado al autor por funcionarios locales en febrero 2008 (Figs. 5 c y d). Probablemente, su vecina contraparte chilena, el glaciar Pío XI, se comporte de la misma manera (Rivera y Cassassa 1999). Aquí, los autores citados han estimado que este glaciar ha avanzado significativamente en las últimas décadas, probablemente debido a resurgimiento (*surging*) y a variaciones de la línea de equilibrio regional (*equilibrium line altitude*, ELA) en relación con la morfología presente del glaciar. Sin embargo, estos autores afirmaron que una elevación sostenida de la línea de equilibrio en el futuro llevará a una rápida declinación del glaciar. En el parque nacional Torres del Paine, Chile, Rivera y Cassassa (2004) establecieron que la pérdida de área total de los glaciares de dicho parque nacional ha sido de 62,2 km<sup>2</sup>, o sea el 8 % del área original de glaciares que se encontraban aquí presentes en 1945 AD, con un máximo de adelgazamiento del hielo de hasta 7,6 m/año durante el periodo estudiado. El glaciar Upsala, el más grande de Argentina continental y uno de los mayores del hemisferio sur fuera de la Antártida, está sufriendo una clara y brutal recesión



**Figura 5:** a) Glaciar Perito Moreno. Vista del frente del glaciar en el sector sur, frente al brazo Rico del lago Argentino; b) frente del glaciar en el sector norte, lago Argentino; c) retroceso de la margen sur de la posición alcanzada en la Pequeña Edad de Hielo; obsérvese la línea de corte en el bosque; d) geoformas subglaciales, del tipo “obstáculo y cola” (*crag and tail*) expuestas en el sector sur, como resultado del retroceso del frente en los últimos años. Fotografías: J. Rabassa, marzo 2008.

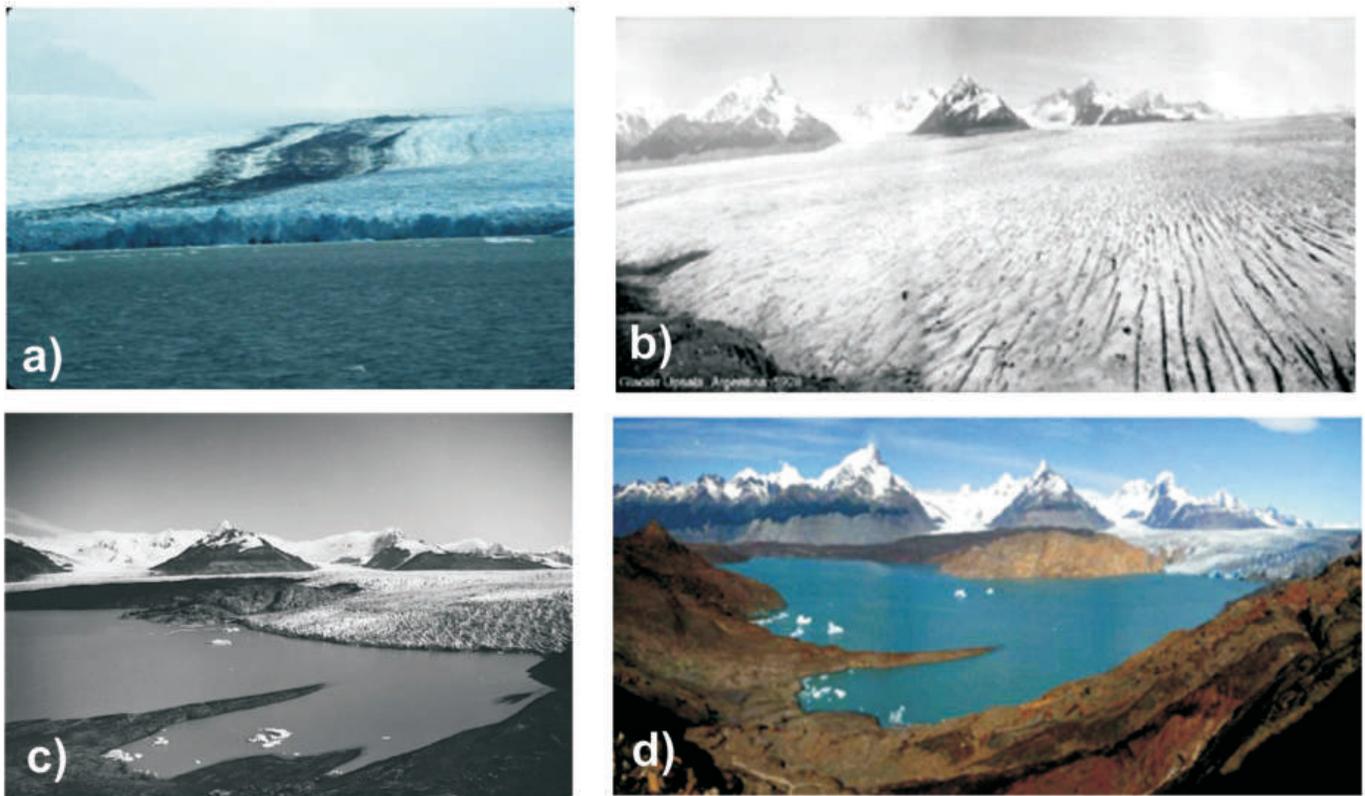
tanto en su frente como en su espesor (Skvarca *et al.* 2003, Fig. 6a). Su recesión frontal ha llegado hasta 8 km tan sólo durante la última década, con retroceso catastrófico en su sector oriental, como lo demuestran los documentos fotográficos (Figs. 6b, c y d). La porción flotante de su lengua colapsó parcialmente luego que la fotografía de la figura 13a fue obtenida en 1981 AD, permitiendo una más profunda penetración por navegación en este brazo, en forma de fiordo, del lago Argentino. Entre abril de 1999 y octubre de 2001, el frente glaciario estuvo fluctuando estacionalmente hasta 400 m, en contraste con la dramática recesión de los años anteriores. Durante este período, el

término occidental del glaciar Upsala tuvo un avance neto de aproximadamente 300 metros.

Imágenes satelitales fueron utilizadas para determinar la reciente velocidad de *calving*, permitiendo confirmar el aumento en las relaciones de tasa de *calving*/profundidad del agua (Skvarca *et al.* 2003). El comportamiento de este glaciar está probablemente relacionado con la pérdida de gran parte, o la totalidad, de su lengua flotante en el lago Argentino, con una reactivación temporaria de su porción apoyada en tierra.

La misma suerte corre la inmensa mayoría de los glaciares alpinos y de descarga de los mantos de hielo que aún hoy sub-

sisten en Patagonia y Tierra del Fuego. Los glaciares patagónicos y fueguinos probablemente han existido por los últimos 100.000 años en forma continua. Estos glaciares han sido seriamente afectados por la actividad humana en tan sólo los últimos 200 años, y en particular desde la finalización de la pequeña edad de hielo. Su retroceso extremo y su eventual desaparición provocarán daños incalculables a la actividad turística, hoy en parte dependiente de su existencia y preservación. La ciudad de Ushuaia depende de las aguas de fusión del glaciar Martial y su cuenca para el abastecimiento de agua potable. En el sector argentino de la Isla Grande de Tierra del Fuego, los glaciares alpinos



**Figura 6:** a) Glaciar Upsala. Frente de hielo en calving en el brazo Norte, lago Argentino, parque nacional Glaciares, provincia de Santa Cruz, Argentina, 1981. (Fotografía: J. Rabassa); b) Glaciar Upsala. Fotografía tomada por el padre Alberto M. De Agostini, 1928, desde el sector oriental del valle; c) idem anterior. Fotografía tomada en 1992, en la cual se observa un lago marginal al hielo (lago Guillermo) que no existía, formado por el retroceso del glaciar desde la década de 1970 (Warren y Aniya, 1999); d) idem anterior. Fotografía tomada por la Organización Greenpeace, en 2004. Obsérvese el retroceso del glaciar en este sector en la última década.

de los Andes Fueguinos están en claro y violento retroceso.

Obsérvese, por ejemplo, las fotografías correspondientes al glaciar Martial (Figs. 7a y b) y al glaciar Alvear Este (Figs. 8a-h). En el primer caso, la ciudad de Ushuaia, Tierra del Fuego, la ciudad más austral del mundo, depende casi totalmente de la descarga hídrica de esta cuenca para el aprovisionamiento de agua potable. El retroceso de este glaciar ha sido claramente documentado en un excelente trabajo de Strelin e Iturraspe (2007), quienes mapearon en gran detalle la posición del frente del glaciar desde el máximo de la pequeña edad de hielo a la actualidad. Lo que antiguamente era un único glaciar de circo se ha dividido en la actualidad en cuatro cuerpos de hielo menores. Utilizando la misma metodología de Bertani *et al.* (1986), se han proyectado hacia el futuro las curvas que representan las variaciones de superficie de los cuerpos gla-

ciarios en relación al tiempo, presentadas por Strelin e Iturraspe (2007), obteniéndose que por lo menos tres de estos cuatro cuerpos de hielo desaparecerían en la primera mitad del presente siglo (Fig. 7b). Durante los meses de estiaje, buena parte del agua disponible en la cuenca proviene de la fusión de la nieve acumulada sobre los remanentes glaciarios, donde el hielo actúa preservando parcialmente su cubierta nival, al absorber el exceso de calor generado por irradiación.

En dichos meses, todo el resto de la nieve de la cuenca ya ha desaparecido por fusión.

Cuando la mayor parte del hielo glaciario desaparezca en el futuro, no habrá posibilidades de preservación de nieve durante el verano y, por lo tanto, ello afectará notablemente el abastecimiento de agua a Ushuaia. Cuando esto suceda, la ciudad habrá superado largamente los 100.000 habitantes, y el agua potable se tornará

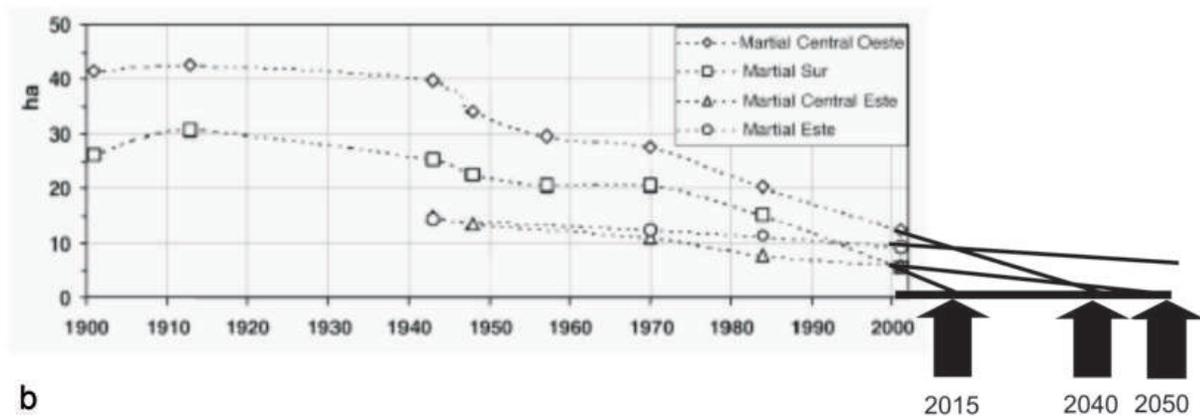
un recurso escaso y de costosa obtención a partir de cuencas vecinas.

En cuanto al glaciar Alvear Este, las diversas imágenes presentadas en las fotografías de la figura 8 demuestran que el sector sur del glaciar está sufriendo un fuerte retroceso, el cual parece acentuarse año tras año. El retroceso del hielo es tan violento que ha permitido la identificación de depósitos carbonáticos de génesis subglacial, que anteriormente no habían sido observados pues el retroceso del hielo no era tan rápido.

Estos carbonatos subglaciales son muy poco frecuentes en el mundo, habiendo sido descritos solamente en Alaska, las Montañas Rocallosas canadienses y en los Alpes suizos. Estos curiosos sedimentos han sido descritos por Rabassa *et al.* (2004) (Figs. 9a - d) y asignados a precipitación de carbonatos a partir de cambios de la presión hidrostática en la base de glaciares templados.



a



b

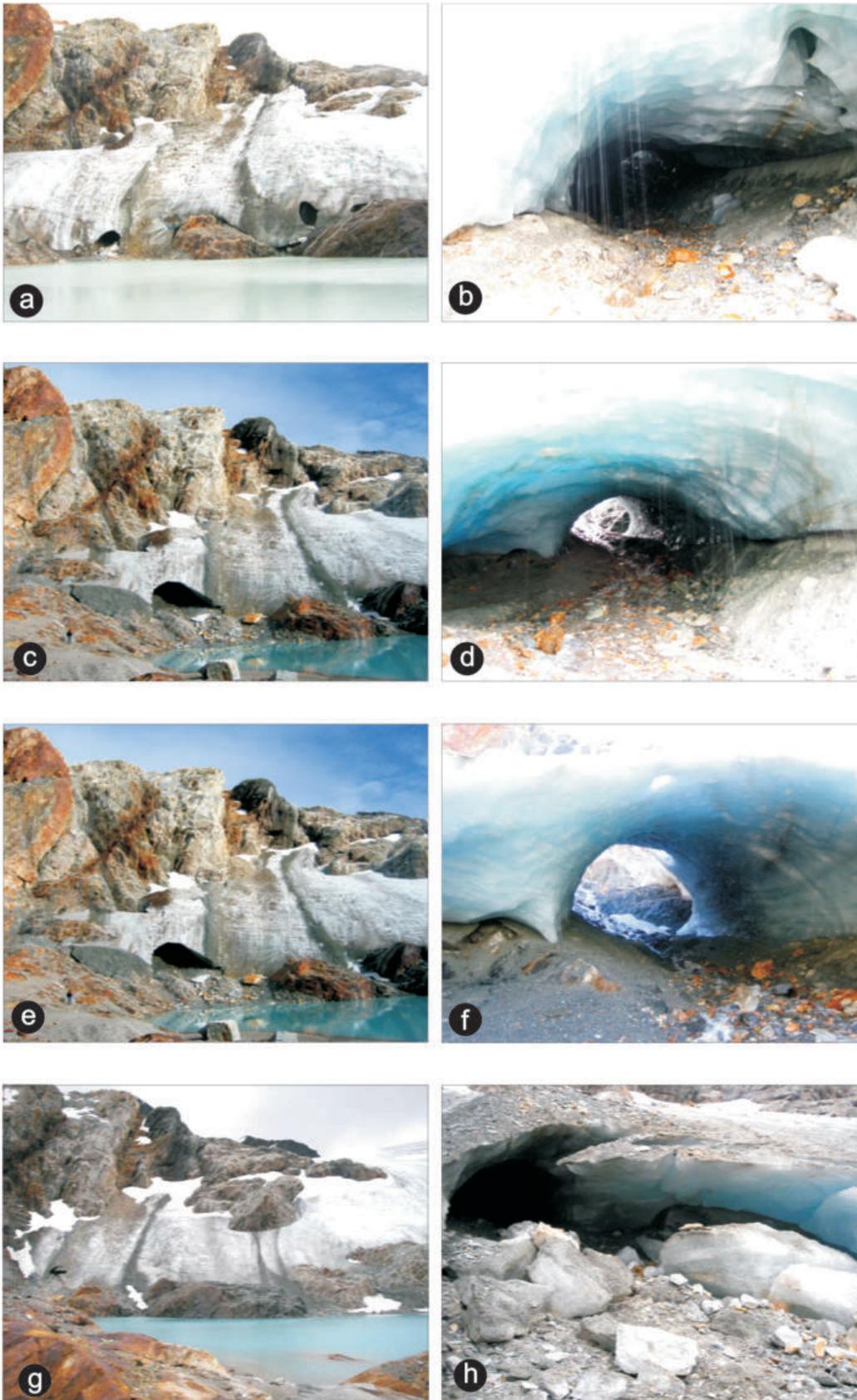
**Figura 7:** a) Glaciar Martial, visto desde el CADIC, Ushuaia, 2004. Fotografía: J. Rabassa; b) diagrama de posible supervivencia de los cuerpos de hielo remanentes. Modificado de Strelin e Iturraspe (2007), según la metodología utilizada por Bertani *et al.* 1986. Eje horizontal, años AD; eje vertical, superficie de los cuerpos de hielo, en hectáreas. Obsérvese que el diagrama con las tendencias más probables de preservación de la superficie glacial, extendidas a lo largo del siglo XXI, sugieren que tres de los cuatro cuerpos de hielo que subsisten en la actualidad desaparecerían en la primera mitad del presente siglo, entre 2015 y 2050.

Muy probablemente, en la primera mitad del presente siglo, la mayoría de estos glaciares habrán desaparecido, generando la pérdida de preciosos ambientes prístinos, humedales alpinos y recursos hídricos, escénicos y turísticos, así como de su legado natural, científico y cultural.

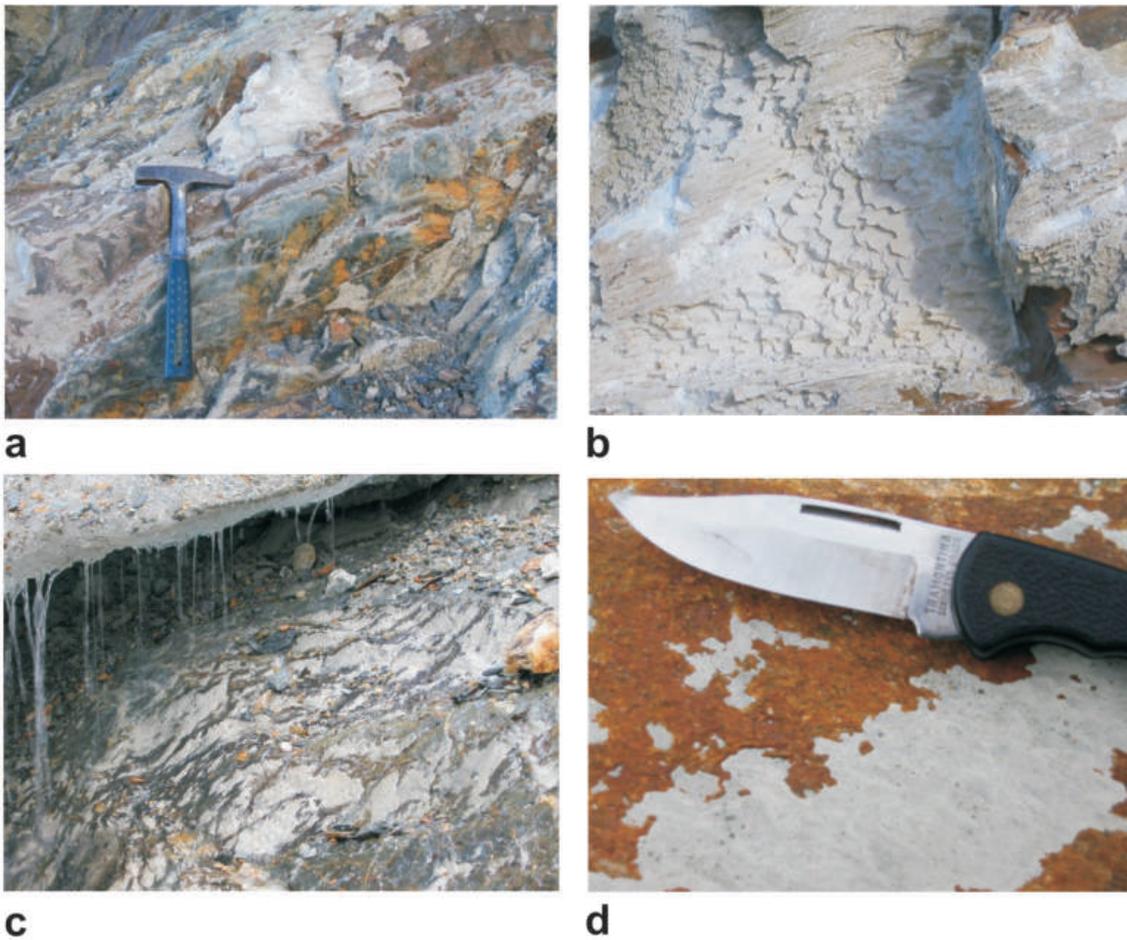
En Patagonia norte, las consecuencias han sido similares. El glaciar del Río Manso (en cerro Tronador, un volcán del Plioceno-Pleistoceno en el parque nacional Na-

huel Huapi; lat. 41° S) ha sido objeto de mapeo detallado y estudios glaciológicos y dendrocronológicos (Rabassa *et al.* 1978, Brandani *et al.* 1986). Este glaciar es una lengua de hielo regenerada, formada por debajo de una muy pronunciada caída de hielo, donde éste se precipita en bloques del casquete glacial local superior. Esta lengua inferior está cubierta por detritus y ha sufrido un colapso dramático durante los últimos 30 años (Figs. 10a - f). En

un valle cercano, el cono inferior del glaciar Castaño Overo fue el tema de una tesis de graduación en geografía en 1983 (Bertani *et al.* 1986, Figs. 11a - d), pero ya ha desaparecido como cuerpo de hielo permanente, debido al intenso derretimiento de los veranos cada vez más cálidos. Así, en tan sólo 20 años, un objeto de estudios científicos, geográficos y glaciológicos, se ha perdido para siempre. La desaparición del cono inferior del gla-



**Figura 8:** a) Glaciar Monte Alvear Este, Andes Fueguinos, lat. 54° S. Porción austral de su frente, tal como se veía en febrero, 2004. Nótese el tamaño relativamente pequeño de la cueva de hielo en la porción izquierda del frente glacial y las dimensiones del afloramiento rocoso inmediatamente a la derecha de ella; b) la cueva de hielo mostrada en la Fig. 8a, febrero de 2004. Nótese la pequeña área iluminada en el extremo lejano de la cueva; c) porción meridional del frente de hielo, en febrero de 2005. Nótese el tamaño agrandado de la cueva de hielo y la emergencia del gran bloque en la pared de hielo directamente a la derecha de ella, el cual no se veía en la fotografía del año anterior, revelando una recesión significativa del frente de hielo en varios metros. Obsérvese también la exposición de los remanentes de hielo oscuro por debajo del hielo más blanco, a la izquierda de la cueva del hielo. Este hielo rico en detritos rocosos es un remanente de hielo muy viejo, claramente de edad anterior a la pequeña edad de hielo, quizás de miles de años de edad, o quizás aún del UMG (ca. 26 ka atrás). El afloramiento rocoso a la derecha se ha incrementado en tamaño, a medida que el frente de hielo retrocedía; d) la cueva de hielo mostrada en la Fig. 8b, en febrero de 2005. Obsérvese el área iluminada mucho mayor, al fondo de la cueva; e) la porción meridional del frente del hielo, vista en febrero de 2006. Obsérvese el tamaño mucho mayor de la cueva de hielo a la izquierda, con notable adelgazamiento del hielo en el techo de la cueva. El bloque rocoso, que había aparecido al descubierto en 2005, había caído ya del frente del hielo y se encontraba entonces en el suelo, indicando que el frente de hielo había retrocedido de su posición en 2005 por lo menos en varios metros. El remanente de hielo oscuro está más expuesto que el año anterior. El afloramiento rocoso a la derecha ha aumentado en su área expuesta total; f) la cueva de hielo mostrada en las figuras 8 b y d, en febrero de 2006. Obsérvese el tamaño mucho mayor de la cueva de hielo. El túnel de hielo en esta fecha aparecía mucho más corto y ancho que en los años anteriores y el techo se ha vuelto inestable; g) el frente del hielo en marzo de 2008. Se observa cómo el techo de la cueva de hielo ha colapsado y el frente de la cueva está cubierto por bloques de hielo despenados; h) la cueva de hielo ha desaparecido como tal. Fotografías: a - f, Jorge Rabassa; g - h, Natalia Martínez (Ushuaia).



**Figura 9:** a) Glaciar Martial, Ushuaia. Depósitos de carbonato de calcio subglacial, que han quedado expuestos como consecuencia del súbito retroceso glaciar; b) idem, detalle de precipitación carbonática; c) Glaciar Alvear Este. Presencia de carbonato de calcio subglacial en el borde del hielo en retroceso y por debajo de él; d) idem, detalle de la costra carbonática precipitada sobre roca de base. Véase Rabassa *et al.* 2004. Fotografías: J. Rabassa, 2004.

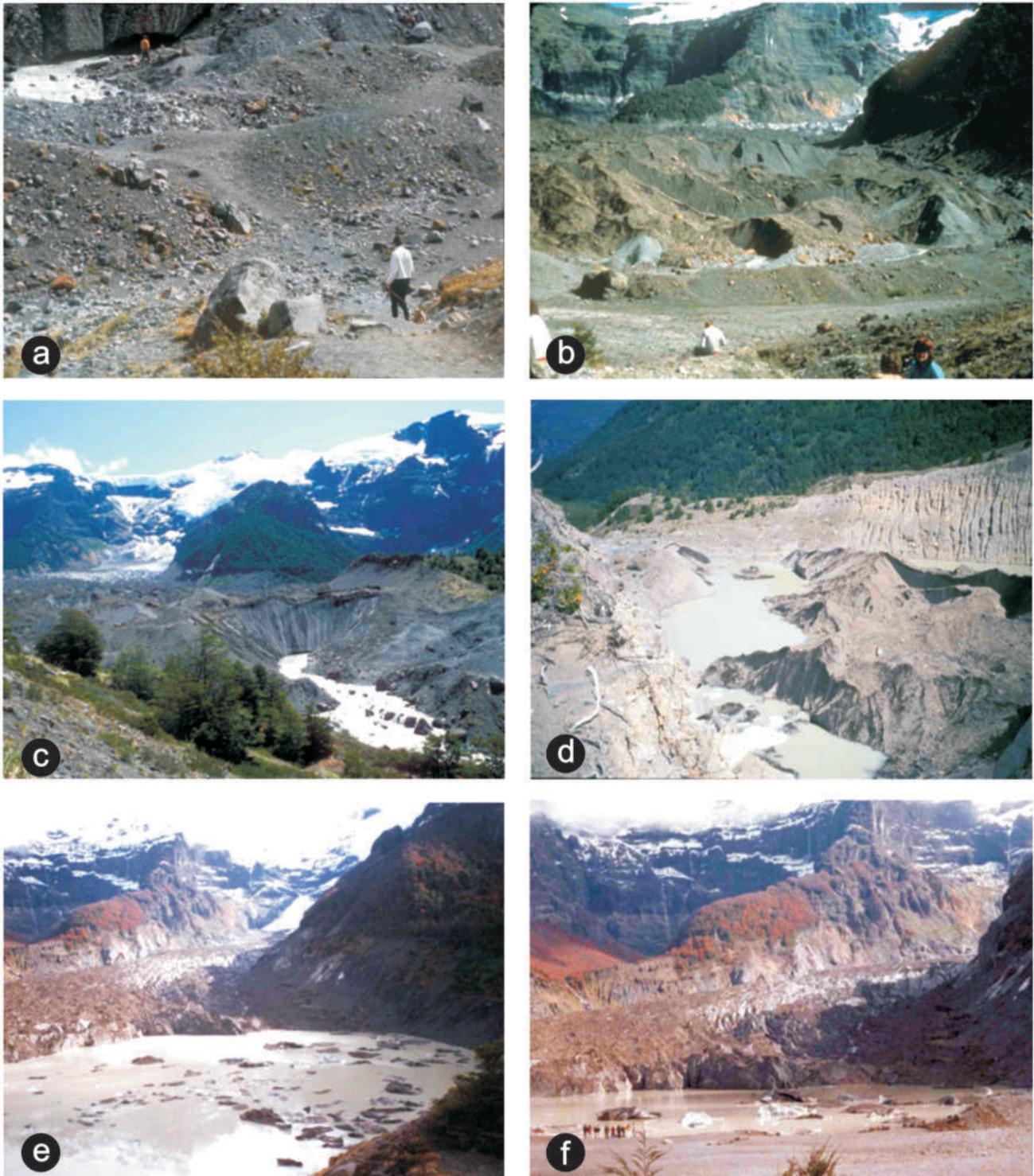
ciar Castaño Overo fue pronosticada ya en 1986 (Bertani *et al.* 1986; Figs. 11c y d). Finalmente, el glaciar Casa Pangué, Cerro Tronador, Chile (Fig. 12) es el glaciar más grande de Patagonia norte con una lengua inferior de hielo regenerado, formada por debajo de enormes cascadas de hielo en las laderas occidentales del cerro Tronador. Esta porción inferior del glaciar está totalmente cubierta por detritus. La cubierta detrítica tenía un espesor continuo de 1 a 3 m, cuando fue descrito por primera vez en 1979. Esta cubierta era tan firme y estable que permitió, en un pasado reciente, la formación de “morenas en tránsito” y desarrollo de suelos, sobre los cuales creció una réplica casi exacta, madura y desarrollada, del bosque regional (la selva valdiviana), quizás desde la pequeña edad de hielo (Rabassa *et al.* 1981). Este bosque supraglacial se movió pendiente abajo a lo largo de décadas (árboles de hasta 60 años fueron estudia-

dos dendrocronológicamente) a medida que el hielo se movía, aunque a una tasa muy lenta. Esta comunidad desapareció en algún momento de la década de 1990 AD, a medida que la fusión del hielo subyacente creó condiciones de inestabilidad en el suelo y los árboles perdieron sustento, cayeron y murieron. Este sorprendente ecosistema, probablemente único en el mundo (se conocen otros ejemplos pero de árboles creciendo sobre hielo muerto), se desvaneció para siempre como resultado de la fuerte tendencia regional al calentamiento. Esta fue quizás la primera víctima del cambio global y el calentamiento global en la región y representa la extinción de una comunidad natural incomparable e irremplazable. Esta pérdida de una deslumbrante porción de la naturaleza en el extremo sur de América del Sur, como consecuencia del cambio global, es claramente injusta considerando que Argentina, en su totalidad, aporta co-

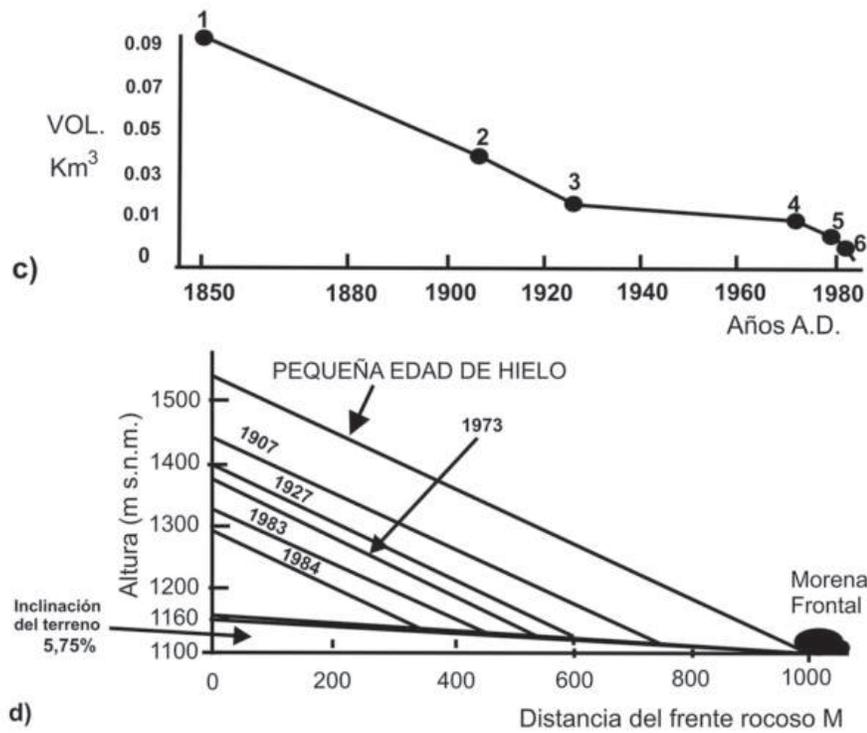
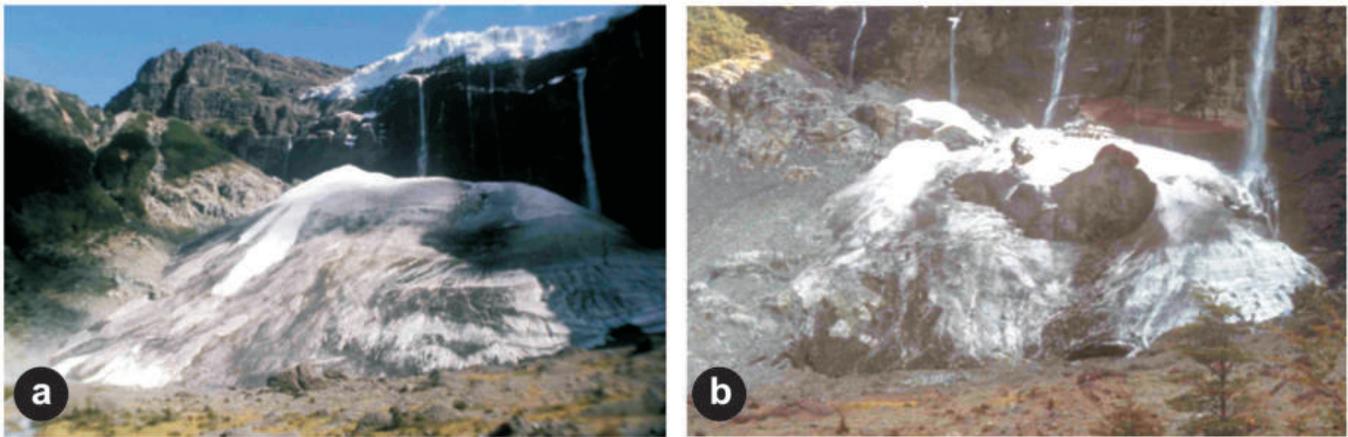
mo país menos del 1% del total global de emisión de gases de invernadero (IPCC 2007).

En áreas cercanas, Larsen (2004) concluyó que las tasas de adelgazamiento en los glaciares patagónicos desde 1995 a 2000 fueron más del doble de las observadas en las dos décadas previas, extendiendo así la observación de este fenómeno a una región mucho más amplia. Asimismo, Rignot *et al.* (2003) han calculado la contribución que ha hecho la fusión de los glaciares de los mantos de hielo de Patagonia al ascenso del nivel del mar. Durante el periodo 1968-2000, la contribución fue del equivalente a un ascenso del nivel del mar de  $0,042 \pm 0,002$  mm/año, pero en el período 1995-2000, la tasa de pérdida aumentó dos veces y media:  $0,105 \pm 0,011$  mm/año.

Los glaciares de Patagonia y Tierra del Fuego han existido y sobrevivido probablemente en forma continua durante por



**Figura 10:** a) fluctuaciones recientes del glaciar Río Manso, cerro Tronador, parque nacional Nahuel Huapi, lat. 41° S, provincia de Río Negro, en 1972. Lengua inferior regenerada. El borde del glaciar llegaba hasta las morenas laterales de la PEH; b) idem, 1982. Nótese el retroceso significativo del frente de hielo desde las morenas laterales mayores del valle y la construcción de una morena lateral abandonada, en pequeña escala, sobre depósitos de kame marginales; c) idem, 1983. Frente del hielo y nacientes del río Manso superior. Obsérvese el espesor del hielo en su frente; d) idem, 1998. Obsérvese la acentuada recesión del hielo desde la posición de 1983 y la formación de lagos marginales con numerosos témpanos; e) idem, 2002. El lago marginal es ahora muy extenso y el frente de hielo ha retrocedido significativamente hacia la izquierda de la imagen; f) idem, 2002. Vista general de la lengua regenerada y de la extensa planicie kame que se ha formado por el drenaje de uno de los lagos marginales. El retroceso del glaciar continuará en el futuro como mínimo hasta el brusco cambio de pendiente donde la lengua se vuelve más angosta. Fotografías: J. Rabassa.



**Figura 11:** a) Glaciar Castaño Overo, cerro Tronador, parque nacional Nahuel Huapi, lat. 41° S, Patagonia Norte, tal como se veía en 1975. Un cono de hielo regenerado, formado por avalanchas de hielo del glaciar superior, el cual se alcanza a ver en la parte superior de la fotografía; b) idem, 1987. El mismo cono visto en la figura anterior. Nótese el gran afloramiento rocoso que aparece expuesto en la porción central del cono, que no existía en 1975. Este cono de hielo desapareció definitivamente durante la década de 1990. Fotografías: J. Rabassa; c) cálculo de la disminución del volumen del cono inferior del glaciar Castaño Overo y estimación de su probable desaparición en la década de 1990 por proyección de la curva. Esta curva fue construida en base a mapas geomorfológicos de las morenas terminales y fotografías aéreas. Las edades fueron obtenidas por dendrocronología; d) reconstrucción de la superficie del cono inferior del glaciar Castaño Overo en base a la posición de las morenas terminales y edades por dendrocronología y fotografías aéreas. Ambas figuras, modificadas de Bertani *et al.* (1986).

lo menos los últimos 100.000 años, desde el comienzo del enfriamiento de fines del Estadío Isotópico de Oxígeno Marino 5 (Rabassa 2008). Sin embargo, ellos han sido gravemente heridos por el cambio global inducido por la actividad humana durante los últimos 150 años, desde el fin de la pequeña edad de hielo. Su desaparición generará un daño enorme y pérdidas económicas a actividades turísticas en Patagonia, algunas de las cuales son enteramente dependientes de su supervivencia y perpetuación. De la misma manera, el parque nacional Los Glaciares, en la provincia de Santa Cruz, ha sido reconocido co-

mo un sitio de patrimonio de la humanidad por UNESCO, pretendidamente un reconocimiento perpetuo y eterno. Sorprendentemente, es la misma humanidad que ha condenado a estos glaciares a la desaparición en un plazo muy breve, probablemente aún antes que su estudio científico pueda ser completado.

### CONSIDERACIONES FINALES

El cambio climático global podría llegar a provocar no sólo la desaparición de los pequeños glaciares de montaña, sino aun

forzar cambios en posición latitudinal, potencia e individualidad de la corriente circumpolar antártica. Estas modificaciones, debidas al cambio climático y una incorporación masiva de agua dulce en los mares australes debido a la fusión glacial intensificada, podrían causar inéditas e inesperadas alteraciones oceanográficas, climáticas y ecológicas en el extremo austral de América del Sur.

Por muchos años, los impactos del cambio global han sido observados en las regiones de altas latitudes. Patagonia y Tierra del Fuego pueden ofrecer ejemplos notables de estas circunstancias y una muda y



**Figura 12:** Glaciar Casa Pangué, cerro Tronador, Chile. Este es el glaciar más grande de la Patagonia norte, con una lengua de hielo regenerada, la cual estaba totalmente cubierta por detritos, de entre 1,0 y 3,0 metros de espesor. Obsérvese el hielo glaciario expuesto debajo de la cubierta detrítica, a lo largo de una gran grieta mostrada en la figura. La cubierta detrítica permitió que en el pasado se formaran “morenas en tránsito”, sobre las cuales se formó un suelo y en él se asentó una réplica casi exacta del bosque regional (la selva valdiviana), quizás desde la pequeña edad de hielo (Rabassa *et al.* 1981). Estos árboles, que se movían muy lentamente pendiente abajo a medida que el hielo infrayacente se desplazaba a lo largo de décadas, desaparecieron para siempre en la década de 1990 AD, a medida que la fusión glacial hizo inestable el suelo supraglacial y plantas perdieron sostén. En la porción inferior derecha a modo de escala, el recordado Jorge Suarez, un distinguido montañista, amigo y colega, ascendiendo por la cresta de hielo hacia las morenas en tránsito. Fotografía: J. Rabassa (1979).

cruel prueba del daño ambiental inducido por actividades humanas irreflexivas. La interminable escalada en el consumo de los combustibles fósiles liderada por las sociedades industriales opulentas y con fuerte aceleración en el resto del mundo (en especial, en los gigantes emergentes como China e India) y el rápido deterioro de los reservorios de carbono en la mayoría de las regiones del planeta serán responsables de la pérdida de los invaluable glaciares y neveros de Patagonia y Tierra del Fuego.

#### AGRADECIMIENTOS

El autor agradece profundamente al departamento de geología de la Universidad de Buenos Aires por la invitación a ofrecer la Conferencia Strobel 2009 y al Dr. Víctor A. Ramos, al Dr. Andrés Folguera y a la Asociación Geológica Argentina por la convocatoria a presentar una ver-

sión de dicha conferencia para su publicación en esta prestigiosa revista.

Una versión preliminar de este trabajo fue preparado mientras el autor se desempeñaba como *International Visiting Scholar* de la *University of Illinois at Urbana/Champaign* (UIUC), en el *Illinois State Geological Survey* (ISGS), en marzo-junio 2006. El autor agradece profundamente al Dr. William W. Shilts, Director de ISGS y al Dr. E. Donald McKay III, Director Alterno y *Chief Scientist* de ISGS, así como a muchos otros distinguidos colegas en ISGS, por su generosa invitación y por proporcionar una magnífica atmósfera para la investigación científica. El Dr. McKay y el Dr. Richard C. Berg (ISGS) revisaron una versión preliminar del texto, el cual fue mejorado notablemente con sus valiosas opiniones. El contenido de este trabajo no refleja necesariamente la opinión de ISGS o la UIUC en estos temas.

Los trabajos de campo sobre los cuales se

ha basado este trabajo fueron financiados por subsidios de CONICET, ANPCYT, Parques Nacionales y *National Geographic Society*, cuya colaboración se agradece profundamente. El autor agradece profundamente a Natalia Martínez (Ushuaia) por las fotografías del glaciar Alvear Este de marzo de 2008.

#### TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Agassiz, J.L. 1840. *Études sur les glaciers*. Jent et Gassmann Lib., 238 p., Neuchâtel.
- Aniya, M. 1999. Recent glacier variations of the Hielos Patagónicos, South America, and their contribution to sea level change. *Arctic, Antarctic and Alpine Research* 21: 165-173.
- Aniya, M. y Enomoto, H. 1986. Glacier variations and their causes in the Northern Patagonia Icefield, Chile, since 1944. *Arctic and Alpine Research* 18(3): 307-316.
- Barrett, P.H. (editor) 1977. *The collected papers of Charles Darwin*. The University of Chicago Press, 326 p., Chicago y Londres.
- Bertani, L., Brandani, A. y Rabassa, J. 1986. Fluctuations of Castaño Overo Glacier in Northern Patagonia since the beginning of the XVI<sup>th</sup> Century. En *Proceedings of the International Symposium on glacier mass-balance, fluctuations and runoff*, Alma-Ata, USSR, 1985; *Data of Glaciological Studies* 57: 192-196; Academia de Ciencias de la URSS versión rusa con figures, 67-72, Moscú.
- Brandani, A., Rabassa, J., Boninsegna, J. y Cobos, D. 1986. Glacier fluctuations during and since the Little Ice Age and forest colonization: Monte Tronador and Volcán Lanín, Northern Patagonian Andes. En *Proceedings of the International Symposium on glacier mass-balance, fluctuations and runoff*, Alma-Ata, USSR, 1985; *Data of Glaciological Studies* 57: 196-205; Academia de Ciencias de la URSS versión rusa con figuras, 72-83, Moscú.
- Clapperton, C. 1993. *Quaternary Geology and Geomorphology of South America*. Elsevier, 779 p., Amsterdam.
- Darwin, C. 1835. *Geological notes made during a survey of the east and west coasts of South America in the years 1832, 1833, 1834 and 1835*. *Proceedings of the Geological Society* 2 (1838): 210-212, London.
- Darwin, C. 1837a. *Observation of proofs of re-*

- cent elevation on the coast of Chili, made during the survey of His Majesty's Ship Beagle. *Proceedings of the Geological Society* 2 (1838): 446-449, London.
- Darwin, C. 1837b. A sketch of the deposits containing extinct Mammalia in the neighbourhood of the Plata. *Proceedings of the Geological Society* 2 (1838): 542-544, London.
- Darwin, C. 1837c. On certain areas of elevation and subsidence in the Pacific and Indian Oceans, as deduced from the study of coral formations. *Proceedings of the Geological Society* 2 (1838): 552-554, London.
- Darwin, C. 1837d. On the formation of mould. *Transactions of the Geological Society* 2, 3, 5 (1840): 505-509, London.
- Darwin, C. 1838. On the connexion of certain volcanic phenomena in South America and on the formation of mountain chains and volcanos, as the effect of the same power by which continents are elevated. *Transactions of the Geological Society* 2, 3, 5 (1840): 601-631, London.
- Darwin, C. 1839a. Observations on the parallel roads of Glen Roy, and of other parts of Lochaber in Scotland, with an attempt to prove that they are of marine origin. *Philosophical transactions of the Royal Society* 1 (1839): 39-81, London.
- Darwin, C. 1839b. Note on a rock seen on an iceberg in 61° South latitude. *Journal of the Royal Geographical Society* 9 (1839): 528-529, London.
- Darwin, C. 1841a. On the distribution of the erratic boulders and on the contemporaneous unstratified deposits of South America. *Transactions of the Geological Society* 2, 6 (1842): 415-431, London.
- Darwin, C. 1841b. On a remarkable bar of sandstone off Pernambuco, on the coasts of Brazil. *London, Edinburgh and Dublin Philosophic Magazine and Journal of Science* 19 (1841): 257-260, London.
- Darwin, C. 1842. Notes on the effects produced by the ancient glaciers of Caernarvonshire, and on the boulders transported by floating ice. *London, Edinburgh and Dublin Philosophic Magazine and Journal of Science* 21 (1842): 180-188, London.
- Darwin, C. 1844a. Extract from letters to the General Secretary, on the analogy of the structure of some volcanic rocks with that of glaciers. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh* (1844-1845), 2 (1851): 17-18.
- Darwin, C. 1844b. On the origin of mould. *Gardener's Chronicle and Agricultural Gazette* 14 (1844): 218.
- Darwin, C. 1844c. Geological observations on the volcanic islands, visited during the voyage of H.M.S. Beagle. Smith, Elder and Co., 176 p., London.
- Darwin, C. 1846a. On the geology of the Falkland Islands. *Quarterly Journal of the Geological Society* 1, 2 (1846): 267-274, London.
- Darwin, C. 1846b. Geological observations on the volcanic islands and parts of South America, visited during the Voyage of H.M.S. "Beagle". Smith, Elder, London, 1<sup>st</sup> edition. (Second edition, 1876) Smith Elder and Co. 280 p., London.
- Darwin, C. 1846c. Origin of saliferous deposits: salt lakes of Patagonia and La Plata. *Quarterly Journal of the Geological Society of London, Proceedings of the Geological Society* 2 (1846): 127-128, London.
- Darwin, C. 1848. On the transportal of erratic boulders from a lower to a higher level. *Quarterly Journal of the Geological Society, Proceedings of the Geological Society* 4 (1848): 315-323, London.
- Darwin, C. 1849. Geology. En Herschel, F.W. (ed.) *A Manual of Scientific Enquiry: prepared for the use of Her Majesty's Navy, and adapted for travellers in general.* Murray, 156-195, London.
- Darwin, C. 1855. On the power of icebergs to make rectilinear, uniformly-directed grooves across a submarine undulatory surface. *London, Edinburgh and Dublin Philosophic Magazine and Journal of Science* 10 (1855): 96-98, London.
- Darwin, C. 1876. Geological observations on the volcanic islands and parts of South America, visited during the Voyage of H.M.S. "Beagle". Smith, Elder and Co., 2nd. edition, 627 p., London.
- Darwin, C. 1946. *Memorias y epistolario íntimo.* Editorial Elevación, 275 p., Buenos Aires.
- Depetris, P. y Pasquini, A.I. 2000. The hydrological signal of the Perito Moreno Glacier Lago Argentino (southern Andean Patagonia): the connection to climate anomalies. *Global and Planetary Change* 26: 367-374.
- Eddy, J.A. 1976. The Maunder Minimum. *Science* 192: 1189-1202.
- Heusser, C.J. 2003. Ice Age Southern Andes. *Developments in Quaternary Science*, volume 3, 240 p., Elsevier
- Heusser, C.J. y Streeter, S.S. 1980. A temperature and precipitation record of the past 16,000 years in Southern Chile. *Science* 210: 1345-1347.
- IPCC 2007. Fourth Assessment Report (FAR). Vol. 1: The Scientific Basis; Vol. 2: Impacts, Adaptation and Vulnerability; Vol. 3: Mitigation; Vol. 4: Synthesis Report. Publicado conjuntamente por IPCC y Cambridge University Press, UK. En [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch).
- Kaplan, M.R., Coronato, A., Hulton, N.R.J., Rabassa, J., Kubik, P.W. y Freeman, S.P., 2007. Cosmogenic nuclide measurements in southern South America and implications for landscape change. *Geomorphology* 87: 284-301.
- Larsen, J. 2004. *Glaciers and Sea Ice Endangered by Rising Temperatures.* Earth Policy Institute, 1350 Connecticut Ave. NW, Suite 403, Washington, DC 20036. En: [www.earth-policy.org](http://www.earth-policy.org).
- Lyell, C. 1830-33. *Principles of Geology.* John Murray, Albemarle-Street, (1830) 1, 511 p.; (1832) 2, 330 p.; (1833) 3, 109 p., London.
- Mann, M. y Bradley, R. 1999. Northern Hemisphere temperatures during the past millenium: inferences, uncertainties and limitations. *Geophysical Research Letters* 26: 7459.
- Masiokas, M.H., Luckman, B.H., Villalba, R., Rিপalta, A. y Rabassa, J., 2009. Little Ice Age fluctuations of Glaciar Río Manso in the Northern Patagonian Andes. *Quaternary Research* 73(1): 96-106.
- Mercer, J. 1976. Glacial history of Southernmost South America. *Quaternary Research* 6: 125-166.
- Milankovitch, M. 1920. *Théorie mathématique de phénomènes thermiques produits par la radiation solaire.* Gauthiers-Villars, Paris, Ed. Royal Serbie Academie 633 p.
- Porter, S.C. 2000. Onset of Neoglaciation in the Southern Hemisphere. *Journal of Quaternary Science* 15: 395-408.
- Rabassa, J. 2007a. El impacto del cambio climático en los glaciares patagónicos y fueguinos. *Ciencia HOY* 17(97): 50-57, Buenos Aires.
- Rabassa, J. 2007b. Global climate change and its impact on the glaciers and permafrost of Patagonia, Tierra del Fuego and Antarctic Pe-

- ninsula. En Leite, P. *et al.* (eds.) A contribution to understanding the regional changes of global climate in South America, Second Regional Conference on Global Change in South America (November 2005), Institute of Advanced Studies, Universidade de São Paulo, 21-40, Sao Paulo.
- Rabassa, J. 2008. Late Cenozoic glaciations in Patagonia and Tierra del Fuego. En Rabassa, J. (ed.) The Late Cenozoic of Patagonia and Tierra del Fuego, *Developments in Quaternary Science* 11: 151-204, Amsterdam.
- Rabassa, J. 2010. Impact of global climate change on glaciers and permafrost of South America, with emphasis on Patagonia, Tierra del Fuego and the Antarctic Peninsula. En Latrubesse, E. (ed.) Natural Hazards and human-exacerbated disasters in Latin America, Special volumes of *Geomorphology, Developments in Earth Surface Processes* 13: 415-438, Amsterdam.
- Rabassa, J., Rubulis, S. y Suarez, J. 1978. Los glaciares del Monte Tronador, Parque Nacional Nahuel Huapi, Río Negro, Argentina. *Anales de Parques Nacionales* 14: 261-316, Buenos Aires.
- Rabassa, J., Rubulis, S. y Suarez, J. 1981. Moraine in-transit as parent material for soil development and the growth of Valdivian Rain Forest on moving ice: Casa Pangué Glacier, Mount Tronador (lat. 41° 10' S), Chile. *Annals of Glaciology* 2: 97-102.
- Rabassa, J., Brandani, A., Boninsegna, J. y Cobos, D. 1984. Cronología de la "Pequeña Edad de Hielo" en los glaciares Río Manso y Castaño Overo, Cerro Tronador, Provincia de Río Negro. 9° Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 624-639, San Carlos de Bariloche.
- Rabassa, J., Franzén, L., Carrera Gómez, P., Cononato, A., Acevedo, D., Veres, D., De Angelis, H., Valcárcel Díaz, M. y Pérez Alberti, A. 2004. Subglacially precipitated carbonates at Alvear Este and Martial glaciers, Andes of Tierra del Fuego, Argentina. *Reunión Argentina de Sedimentología, Actas*: 143-146, San Juan.
- Rignot, E., Rivera, A. y Cassassa, G. 2003. Contributions of the Patagonian icefields of South America to sea level rise. *Science* 302: 434-437.
- Rivera, A. y Cassassa, G. 1999. Volume changes on Pio XI Glacier, Patagonia: 1975-829. *Global and Planetary Change* 22: 233-244.
- Rivera, A. y Cassassa, G. 2004. Ice elevation, areal and frontal changes of glaciers from National Park Torres del Paine, Southern Patagonia Icefield. *Arctic, Antarctic and Alpine Research* 36(4): 379-389.
- Ruddiman, W.F. 2005. How did humans first alter global climate? *Scientific American* March 2005, 8 p.
- Skvarca, P., Raup, B. y De Angelis, H. 2003. Recent behaviour of Glacier Upsala, a fast calving glacier in Lago Argentino, southern Patagonia. *Annals of Glaciology* 36 (1): 184-188.
- Strelin, J. y Iturraspe, R. 2007. Recent evolution and mass balance of Cordón Martial glaciers, Cordillera Fueguina Oriental. *Global and Planetary Change* 26: 1-10.
- Uriarte Cantolla, A. 2003. Historia del clima sobre la Tierra. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco, Vitoria-Gasteiz, 306 p.
- Warren, C. y Aniya, M. 1999. The calving glaciers of Southern South America. *Global and Planetary Change* 22: 59-77.

Recibido: 17 de junio, 2010  
Aceptado: 23 de julio, 2010