



El Cambio Climático y los Recursos Hídricos en los Andes Tropicales

Mathias Vuille

**Banco
Interamericano de
Desarrollo**

Unidad de
Salvaguardias
Ambientales

NOTA TÉCNICA

IDB - TN - 517

marzo 2013

El Cambio Climático y los Recursos Hídricos en los Andes Tropicales

Mathias Vuille



Banco Interamericano de Desarrollo

2013

Catalogación en la fuente proporcionada por la
Biblioteca Felipe Herrera del
Banco Interamericano de Desarrollo

Vuille, Mathias.

El cambio climático y los recursos hídricos en los Andes tropicales / Mathias Vuille.
p. cm. (IDB Technical Note; 517)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Water resources development—Andes Region. 2. Water use—Andes Region. 3. Climatic changes—Andes Region. I. Banco Interamericano de Desarrollo. Unidad de Salvaguardias Ambientales. II. Title. III. Series.

Códigos JEL: Q5, Q54, Q25

Palabras Clave: ciclo hidrológico, escasez de agua

<http://www.iadb.org>

Las opiniones expresadas en esta publicación son exclusivamente de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.

Se prohíbe el uso comercial no autorizado de los documentos del Banco, y tal podría castigarse de conformidad con las políticas del Banco y/o las legislaciones aplicables.

Copyright © 2013 Banco Interamericano de Desarrollo. Todos los derechos reservados; este documento puede reproducirse libremente para fines no comerciales.

Tabla de contenido

| | |
|--|-----|
| Abreviaturas | ii |
| Resumen..... | iii |
| 1. Cambios observados y previstos en el clima andino y su ciclo hidrológico | 1 |
| 2. Efectos del cambio climático en los sistemas naturales y en sus servicios ambientales | 4 |
| 3. Tensiones socioeconómicas derivadas de la escasez de agua | 11 |
| 4. Desafíos del futuro..... | 15 |
| Gráficos..... | 19 |
| Referencias..... | 21 |

Abreviaturas

| | |
|--------|--|
| ACCION | La Red Interamericana de Observatorios del Cambio Climático en los Andes |
| HadCM3 | Modelo Atmósfera-Océano Creado en el <i>Hadley Center</i> |
| IPCC | Panel Intergubernamental del Cambio Climático |
| NOS | El Niño-Oscilación del Sur |

Resumen

Sin lugar a dudas, el cambio climático afectará el acceso futuro a agua potable, así como a agua para saneamiento, riego y agricultura, operaciones mineras y generación de energía hidroeléctrica en los Andes tropicales. Algunos de estos cambios se percibirán directamente por las alteraciones en los regímenes de las precipitaciones, la cantidad total de lluvia o nevadas o la duración de las estaciones lluviosas. Otros cambios podrían estar modulados por ajustes en los servicios ecosistémicos, como el retroceso de los glaciares o la degradación de humedales (páramos), lo cual altera la calidad del agua o la estacionalidad del caudal de los ríos. Los conflictos sociales, económicos y ambientales en torno a la lucha por el control del agua se exacerbarán en zonas donde la escasez de agua se yuxtapone al rápido crecimiento de su demanda a causa de la presión demográfica y las actividades económicas en expansión, amenazando las prácticas tradicionales de riego y uso del agua.

En este documento se describen los desafíos que plantea el uso actual y futuro del agua en los Andes tropicales, comenzando por un análisis del ciclo hidrológico proyectado presente y futuro, así como los efectos previstos sobre los servicios ambientales que suministran los glaciares y la vegetación de los humedales. Luego se abordarán en detalle las tensiones y conflictos que existen en este momento en relación con el uso del agua desde una perspectiva socioeconómica. Por último, se hará hincapié en los desafíos por delante y se considerarán posibles soluciones para lograr que en el futuro el uso del agua en la región sea más sostenible y equitativo.

1. Cambios observados y previstos en el clima andino y su ciclo hidrológico

Los Andes tropicales, que separan la circulación atmosférica de bajo nivel, forman uno de los gradientes climáticos en dirección este-oeste más marcados del mundo¹. En la vertiente occidental de los Andes, al sur del ecuador, las frías aguas oceánicas y un movimiento descendente a gran escala de masas de aire mantienen condiciones frías y secas. La combinación de estas dos características evita efectivamente que la humedad penetre tierra adentro y ascienda hacia los Andes. En cambio, al este, el transporte de abundante humedad del Atlántico tropical genera condiciones muy húmedas y elevadas tasas de precipitación en la cuenca del Amazonas. En los propios Andes, los vientos del este propician la entrada de humedad hacia las montañas en los meses de verano, dando como resultado una estación lluviosa muy distintiva entre noviembre y abril en gran parte de Perú, mientras que más al sur en Bolivia y en el extremo norte de Chile, la estación lluviosa solo dura de diciembre a marzo². En los Andes ecuatorianos, la estacionalidad de la precipitación es bimodal, con dos estaciones lluviosas principales de marzo a mayo y de septiembre a noviembre³. Por su parte, los Andes colombianos, ubicados en el hemisferio norte, son bastante húmedos, y la estacionalidad de la precipitación está modulada por la topografía, pero la principal estación lluviosa se extiende de junio a agosto⁴.

Las variaciones interanuales en la precipitación pueden ser considerables y obedecen primordialmente al fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS). Durante este fenómeno, las aguas cálidas superficiales frente a la costa de Ecuador y Perú a menudo ocasionan lluvias torrenciales en los desiertos costeros⁵. Sin embargo, esta precipitación no llega a alturas superiores a ~2000 metros, de manera que no afecta a los Andes más allá de las laderas occidentales más bajas. De hecho, El Niño ocasiona una fuerte corriente del oeste en gran parte de los Andes tropicales, lo que inhibe considerablemente el transporte de humedad procedente de la cuenca del Amazonas y trae consigo condiciones de sequía en los Andes tropicales, en particular en la región del altiplano de Bolivia y el sur de Perú⁶. La sequía ocasionada por El Niño también se observa con frecuencia en los Andes colombianos y el norte de Ecuador⁷. Los

¹ Garreaud et al., 2009.

² Garreaud et al., 2003.

³ Vuille et al., 2000a.

⁴ Poveda et al., 2001.

⁵ Garreaud et al., 2009.

⁶ Garreaud y Aceituno, 2001; Vuille, 1999; Vuille et al., 2000b; Vuille y Keimig, 2004; Lavado Casimiro et al., 2012.

⁷ Poveda et al., 2001; Vuille et al., 2000a.

episodios de El Niño provocan además un fuerte calentamiento en los Andes tropicales, por lo que en general se caracterizan por ser cálidos y secos, mientras que los de la Niña tienden a ocasionar condiciones frías y húmedas en buena parte de esa región⁸.

Las condiciones climáticas medias en los Andes tropicales sufrieron cambios considerables durante el siglo XX. La temperatura aumentó alrededor de 0,7 °C entre 1939 y 2006⁹, aunque el incremento varía en función de la elevación y la pendiente¹⁰. En varios estudios se han documentado tendencias de calentamiento similares a nivel más regional¹¹. Este aumento de la temperatura permite entender las tasas actuales y futuras del retroceso de los glaciares, pues el nivel de congelación determina no solo en qué medida el glaciar está expuesto al derretimiento superficial, sino también la relación entre lluvia y nieve que cae en un glaciar¹².

Las tendencias de las precipitaciones son más débiles y mucho menos coherentes, debido a la fuerte modulación que la topografía andina imprime en las características de las precipitaciones. También hay muchas menos estaciones de alta calidad que cuenten con largas series de precipitación, lo que dificulta en gran medida la evaluación de los cambios a largo plazo en las precipitaciones. Con base en un análisis de 42 estaciones en los Andes de Ecuador, Perú y Bolivia entre 1950 y 1994, en 2003 Vuille et al. identificaron una tendencia a una mayor precipitación al norte de ~11°S, mientras que la mayoría de las estaciones ubicadas más al sur registraron una menor precipitación¹³. Aunque esta señal de precipitación de gran escala mostró un cierto grado de coherencia espacial, la mayoría de las tendencias de las estaciones individuales no fueron considerables. No obstante, en 2006 Haylock et al. confirmaron estos resultados y también informaron de un cambio a condiciones más húmedas en Ecuador y el norte de Perú, con tendencias opuestas en el sur de Perú¹⁴. Por último, en 2010 Thibeault et al. identificaron una tendencia hacia un inicio más tardío de la estación lluviosa en el altiplano boliviano, con lluvias menos frecuentes, pero más intensas¹⁵.

Los estudios sobre el futuro cambio climático son bastante limitados y se centran principalmente en los cambios de la temperatura y las precipitaciones para fines del siglo XXI de acuerdo con diferentes casos hipotéticos del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el

⁸ Vuille et al., 2000a,b; Vuille et al., 2008b.

⁹ Vuille et al., 2008a.

¹⁰ Vuille y Bradley 2000; Vuille et al., 2003.

¹¹ Mark, 2002; Mark y Seltzer 2005; Racoviteanu et al., 2008; Poveda y Pineda, 2009.

¹² Favier et al., 2004; Bradley et al., 2009.

¹³ Vuille et al., 2003.

¹⁴ Haylock et al., 2006.

¹⁵ Thibeault et al., 2010.

Cambio Climático (IPCC). En 2004, Bradley et al., por ejemplo, analizaron los cambios de temperatura en los Andes en casos hipotéticos en los que se duplicaban las concentraciones de dióxido de carbono¹⁶. En las simulaciones, los cambios de temperatura muestran una fuerte dependencia de la elevación, y el mayor calentamiento se observa en lugares de gran elevación, donde están los glaciares. En 2006, Bradley et al. utilizaron el caso hipotético A2 de alto nivel de emisiones para documentar que los Andes tropicales podrían experimentar un calentamiento del orden de 4,5 °C –5 °C para fines de este siglo, de nuevo con los aumentos de temperatura más marcados a mayores elevaciones¹⁷.

En un estudio de seguimiento, Urrutia y Vuille llevaron a cabo la primera simulación de un modelo climático regional de alta resolución para esta región¹⁸. En el Gráfico 1 se muestra el calentamiento de la superficie previsto para finales del siglo XXI con base en un caso hipotético de altos nivel (A2) y bajo nivel (B2) de emisiones. Los resultados indican que para fines de siglo, según el caso hipotético A2, se producirá un calentamiento considerable de 5 °C a 6 °C en muchas partes de los Andes. Se espera que el mayor calentamiento se registre en los puntos más elevados de la región de la Cordillera Blanca, localizada en Perú. En el caso hipotético B2, de menores emisiones, el calentamiento de la superficie es de alrededor de la mitad de la amplitud de la proyección del caso hipotético A2.

Quizás resulten aún más desconcertantes las proyecciones de la futura variabilidad interanual y la probabilidad de que algunos años sean extremadamente calurosos. En el Gráfico 2 se muestra la distribución de la temperatura andina para el período 2071–2100 en los casos hipotéticos A2 y B2 en comparación con una simulación de control para los años 1961–1990. Los resultados documentan claramente que el clima no solo será considerablemente más cálido en el futuro, sino que habrá mayores probabilidades de años extremadamente calurosos. Más importante aún, en el Gráfico 2 se muestra que en el futuro incluso los años más fríos en los casos hipotéticos A2 o B2 serán mucho más calurosos que los años más cálidos observados en la actualidad. En esencia, estamos pasando a una situación “no análoga”, lo cual planteará una seria amenaza para la capacidad de adaptación de los ecosistemas andinos, que se han ajustado a las condiciones actuales a lo largo de varios milenios.

¹⁶ Bradley et al., 2004.

¹⁷ Bradley et al., 2006.

¹⁸ Urrutia y Vuille, 2009.

Los futuros cambios en la cantidad o la estacionalidad de la precipitación son mucho más difíciles de simular. Ello se debe en parte a las incertidumbres de los modelos y su limitada capacidad para simular con precisión el ciclo hidrológico mundial, además de que las dificultades se exageran cuando se consideran cambios regionales en una zona como los Andes, donde la precipitación está tan fuertemente modulada por la topografía. Urrutia y Vuille examinaron los cambios en la precipitación a finales del siglo XXI en el caso hipotético A2 con el mismo modelo regional utilizado en su análisis de temperatura¹⁹. De acuerdo con sus resultados, la precipitación podría incrementarse a lo largo de las zonas costeras de Colombia y Ecuador, así como en algunos lugares en los Andes orientales al sur del Ecuador, mientras que en los Andes tropicales del sur, incluida la región del altiplano, podría registrarse una menor precipitación. Sin embargo, estos resultados se deben interpretar con cautela, pues se basan en un solo modelo de circulación regional y un solo modelo mundial de referencia (HadCM3).

Más recientemente, Minvielle y Garreaud adoptaron un enfoque distinto, llamado reducción de escala estadística, donde aprovecharon la relación empírica tan estrecha que se observa entre la circulación de nivel superior y la precipitación en la región del altiplano para inferir cambios en el régimen pluvial hacia finales de este siglo de acuerdo con los futuros cambios simulados en la circulación²⁰. Sus resultados, basados en 11 modelos de circulación general distintos, conforme al caso hipotético A2, indican una futura reducción durante casi todo el año de la corriente del este sobre el altiplano. Como en las actuales condiciones climáticas se requieren fuertes vientos del este para mantener un flujo considerable de humedad hacia el altiplano, este resultado podría interpretarse como una alta probabilidad de una futura reducción de la precipitación, que según una cuantificación de Minvielle y Garreaud podría cifrarse en el orden de 10% a 30% respecto de los índices actuales²¹.

2. Efectos del cambio climático en los sistemas naturales y en sus servicios ambientales

Los cambios observados en la temperatura han provocado un rápido y acelerado retroceso de los glaciares tropicales en toda la región de los Andes tropicales. Aunque la disminución de las precipitaciones puede haber contribuido a ese retroceso a escala regional, la falta de una

¹⁹ *Ibíd.*

²⁰ Minvielle y Garreaud, 2011.

²¹ *Ibíd.*

tendencia negativa coherente de las precipitaciones en toda la extensión de los Andes tropicales indica que los cambios en las precipitaciones no fueron el principal factor determinante de los cambios observados²².

En Venezuela, los cinco glaciares de circo restantes (de los 10 que aún existían en 1952) ya no están en equilibrio con el clima moderno y solo ocupan, en total, 1,2 km²²³. Todos registraron un rápido retroceso durante el siglo XX, al perder más del 95% de su superficie desde 1850²⁴ (véase el Gráfico 3).

En Colombia, se conservan actualmente seis cadenas montañosas con glaciares, mientras que ocho glaciares desaparecieron por completo en el último siglo²⁵. De acuerdo con Poveda y Pineda, la superficie total de glaciares que quedaba en Colombia en 2007 era de 45 km², con un promedio de pérdida de superficie glaciar estimado en 3,0 km² año⁻¹²⁶.

En Ecuador, los glaciares en los volcanes Antizana, Cotopaxi y Chimborazo se han estudiado con mayor detalle. Un glaciar del Antizana, llamado glaciar 15, ha estado retrocediendo durante los últimos 50 años, pero su índice de retroceso fue de siete a ocho veces más veloz entre 1995 y 2000 que durante el período 1956–1993²⁷. En la tendencia de largo plazo se superponen períodos de retroceso más veloces o más lentos, que se han vinculado con la fase de ENOS, debido al balance de masas altamente negativo en el Antizana durante El Niño, mientras que el balance de masas se mantiene casi equilibrado durante los episodios de La Niña²⁸. También se ha reconstruido la extensión de los glaciares en el volcán Cotopaxi por medio de la fotografía aérea. Los resultados muestran que el Cotopaxi perdió aproximadamente el 42% de su cobertura de hielo entre 1976 y 2006²⁹. La pérdida total de masa (espesor) en ciertos glaciares del Cotopaxi fue igual a 78 metros entre 1976 y 1997, lo cual es coherente con valores similares obtenidos para el Antizana. En el volcán Chimborazo, el retroceso reciente de los glaciares también fue bastante considerable, pues hubo algunos que perdieron hasta el 59,3% de su superficie entre 1962 y 1997³⁰.

²² Rabatel et al. En preparación.

²³ Carillo, 2011.

²⁴ Schubert, 1992, 1998.

²⁵ Ceballos et al., 2006.

²⁶ Poveda y Pineda, 2009.

²⁷ Francou et al., 2000.

²⁸ Francou et al., 2004.

²⁹ Jordan et al., 2005; Cáceres, 2011.

³⁰ Cáceres, 2011.

La mayor extensión de glaciares tropicales se encuentra en los Andes peruanos, en particular en la Cordillera Blanca, la cadena montañosa tropical con mayor densidad de glaciares del mundo. En 1970, los 722 glaciares de la Cordillera Blanca aún cubrían una superficie de 723,4 km²³¹, pero para finales del siglo XX esa cifra se había reducido a menos de 600 km²³². Racoviteanu et al. estimaron que la superficie total de glaciares había disminuido 22,4% entre 1970 y 2003³³. También se observaron grandes tasas de retroceso en glaciares individuales de la Cordillera Blanca que se estudiaron en mayor detalle³⁴, así como en la cordillera Ampato, más árida, en el sudoeste de Perú³⁵ y en la cordillera de Vilcanota en el sur de Perú³⁶.

De igual modo, se ha observado un rápido retroceso de los glaciares en la Cordillera Real de Bolivia³⁷. Los glaciares de Charquini, por ejemplo, han perdido entre 65% y 78% del tamaño que tenían en la Pequeña Edad de Hielo y las tasas de recesión se han cuadruplicado en las últimas décadas³⁸. El glaciar Chacaltaya, que anteriormente se ubicaba en la cordillera Real³⁹ y se utilizaba como pequeña estación de esquí (la más elevada del mundo, a 5.400 metros), desapareció por completo en 2009. Su desaparición es representativa de muchos glaciares pequeños en la región, donde las tasas de retroceso se han incrementado cuando el glaciar alcanza un tamaño crítico y la advección de aire cálido de las rocas sin hielo de los alrededores adquiere una importancia crucial⁴⁰. Recientemente, Soruco et al. estimaron que los 376 glaciares de la Cordillera Real habían sufrido, en promedio, una pérdida del 43% (0,9 km³) de volumen entre 1963 y 2006 y del 48% de su superficie entre 1975 y 2006⁴¹.

A la larga, estos cambios en el volumen de los glaciares provocarán cambios considerables en la hidrología estacional de los glaciares aguas abajo. Se prevé que los cambios más importantes en el caudal ocurran durante la estación seca, cuando los glaciares liberan agua derretida que inicialmente retienen en forma de nieve y hielo⁴². La nieve que cae en los Andes inicialmente se almacena en forma de hielo en los glaciares de montaña antes de que se libere al cabo de cierto tiempo y se sume al caudal base de la estación seca. Por consiguiente, los

³¹ Ames et al., 1989.

³² Georges, 2004.

³³ Racoviteanu et al., 2008.

³⁴ Hastenrath y Ames, 1995; Kaser et al., 1996; Ames, 1998; Mark et al., 2005; Raup et al., 2006; Bury et al., 2011.

³⁵ Racoviteanu et al., 2007; Silverio y Jaquet, 2012.

³⁶ Brecher y Thompson, 1993; Thompson et al., 2006.

³⁷ Jomelli et al., 2009, 2011; Soruco et al., 2009a.

³⁸ Rabatel et al., 2006.

³⁹ Ramírez et al., 2001; Francou et al., 2003.

⁴⁰ Francou et al., 2003.

⁴¹ Soruco et al., 2009b.

⁴² Viviroli et al., 2011.

glaciares desempeñan una función esencial como amortiguadores cruciales de las precipitaciones estacionales y suministran agua durante la estación seca para numerosos usos domésticos, agrícolas o industriales⁴³. Este servicio ambiental de los glaciares ha sido documentado, por ejemplo, por Kaser et al., quienes demostraron que el porcentaje de zona glaciar en las cuencas de captación de los Andes tropicales guarda una estrecha relación con su capacidad para almacenar las precipitaciones⁴⁴.

En un caso hipotético futuro en que los glaciares sigan retrocediendo y lleguen a desaparecer por completo, al menos de las cuencas de captación de menor elevación, resulta lógico suponer que la escorrentía pasará gradualmente de suministrar agua en forma continua a una situación en la que en su mayor parte se concentrará en la estación lluviosa con un caudal base escaso o nulo en la estación seca. Este problema es de especial preocupación en los Andes tropicales, donde la fuerte radiación solar impide la formación de una capa de nieve estacional. A diferencia de lo que ocurre en los Alpes o en las Rocallosas, el agua del deshielo de la nieve no aporta una reserva de agua adicional que cambie estacionalmente⁴⁵.

El caso hipotético que se acaba de describir ya se puede observar en algunas regiones de los Andes tropicales. Mark et al., por ejemplo, señalan que del 30% al 45% del caudal que fluye de la Cordillera Blanca al valle del río Santa en la estación seca se puede atribuir al derretimiento de glaciares que no se renueva⁴⁶. Por su parte, Mark y McKenzie mostraron que la descarga glaciar relativa en la cuenca superior del río Santa está aumentando⁴⁷. De manera similar, las mediciones en el glaciar Zongo, en la cordillera Real, indican que de la cuenca de captación sale más agua en forma de escorrentía que la suministrada por la precipitación y que el derretimiento del glaciar aporta la diferencia⁴⁸.

Esta situación plantea consideraciones de sostenibilidad, sobre todo a la luz del rápido crecimiento de la población y del sector industrial en los valles aguas abajo⁴⁹. Los usuarios se adaptan rápidamente a una mayor disponibilidad de agua en el corto plazo, aunque una escorrentía de este tipo no es sostenible a largo plazo. Sin embargo, hay indicios de que quizá ya pasamos este umbral en algunas cuencas. Baraer et al., por ejemplo, observaron que siete de cada

⁴³ Vuille et al., 2008a.

⁴⁴ Kaser et al., 2003.

⁴⁵ Kaser et al., 2003, 2010.

⁴⁶ Mark et al., 2005.

⁴⁷ Mark y McKenzie, 2007.

⁴⁸ Ribstein et al., 1995.

⁴⁹ Kaser et al. 2003; Young y Lipton, 2006; Buytaert y DeBievre, 2012.

nueve cuencas estudiadas en la Cordillera Blanca excedieron el umbral crítico en que los glaciares se han vuelto tan pequeños que la descarga en la estación seca ya es reducida⁵⁰. De acuerdo con sus resultados, la descarga en la estación seca disminuirá hasta 30% cuando los glaciares desaparezcan por completo de estas cuencas de captación. Más aún, la descarga de toda la cuenca del río Santa procedente de la Cordillera Blanca se ha reducido 17% de 1954 a 1997, aunque se desconoce en qué medida han contribuido a ello las extracciones humanas aguas arriba⁵¹.

Aún se desconoce el desenlace de estos cambios en el futuro, pues existen muy pocos estudios de modelización hidrológica sobre este tema y las incertidumbres en este tipo de modelización son ingentes⁵². Juen et al. simularon cómo podría cambiar la escorrentía mensual en la Cordillera Blanca con base en simulaciones del caudal para los años 2050 y 2080, utilizando un modelo de escorrentía de glaciares forzado con el producto de varios modelos de circulación general⁵³. Según sus resultados, la escorrentía de la estación seca se reducirá considerablemente, en particular en un caso hipotético A2 de emisiones elevadas, mientras que la descarga en la estación lluviosa aumentará a causa de la mayor escorrentía directa. La descarga total no cambia mucho en sus resultados, pero la estacionalidad se intensifica sustancialmente. Asimismo, cabe destacar que los cambios en el caudal son mucho mayores en 2050 en el caso hipotético A2 que en 2080 en el caso hipotético B1, más moderado, lo que demuestra una gran dependencia de la trayectoria de emisiones que se siga⁵⁴.

La amplitud del cambio simulado en el caudal depende en gran medida del grado actual de glaciación dentro de la cuenca de captación. La escorrentía estacional de una cuenca de captación con una vasta cobertura glaciar experimentará un gran cambio a medida que los glaciares se contraigan. Por otro lado, una cuenca de captación donde el glaciar ya sea pequeño y, por consiguiente, carezca de capacidad para amortiguar la escorrentía no registrará un cambio considerable incluso si el glaciar llegara a desaparecer por completo en el futuro⁵⁵. Estos resultados ponen de manifiesto la importancia de tener en cuenta los futuros cambios y, en consecuencia, toda medida de adaptación en función del caso, en vez de aplicar medidas generalizadas que quizá no sean adecuadas para muchas cuencas.

⁵⁰ Baraer et al., 2012.

⁵¹ Mark et al., 2010.

⁵² Buytaert et al., 2010.

⁵³ Juen et al., 2007.

⁵⁴ Vuille et al., 2008a.

⁵⁵ *Ibid.*

No obstante, conviene destacar que este proceso depende mucho de la escala, pues la influencia del derretimiento glaciar respecto al caudal total disminuye conforme aumenta la distancia desde el propio glaciar. Así pues, mientras que la contribución del derretimiento glaciar es sumamente pertinente para las poblaciones andinas que viven cerca de la cadena montañosa cubierta de glaciares, su importancia es mucho menor para los centros de población ubicados lejos de ahí. Además, el efecto del retroceso de los glaciares en la hidrología del caudal aguas abajo depende de la estacionalidad de las precipitaciones en las tierras bajas circundantes. Como regla general, la contribución de un glaciar a la esorrentía estacionalmente tardía es más pertinente para países como Bolivia o Perú, donde los ríos entran en regiones que son áridas en ciertas estaciones⁵⁶. En cambio, en países como Ecuador o Colombia —donde los glaciares son muy pequeños, el clima es mucho más húmedo y la precipitación se distribuye de manera más equitativa durante todo el año— es probable que estos cambios en la hidrología de los glaciares no sean muy pertinentes a mayor escala. Además, estos países se benefician de la importante capacidad de amortiguación de los humedales tropicales⁵⁷.

Estos humedales, conocidos como páramos, son ecosistemas alpinos neotropicales que cubren los Andes tropicales del norte, entre Venezuela y el norte de Perú, desde el límite superior de la vegetación arbórea, a ~3500 metros, hasta el límite de nieve permanente, a ~5000 metros⁵⁸. Se considera que los páramos son una importante fuente de agua para el altiplano andino y proveen agua para una vasta zona de las tierras bajas, mucho más secas, de la costa del Pacífico de Ecuador y el norte de Perú⁵⁹. Muchas de las ciudades más grandes, como Bogotá en Colombia y Quito en Ecuador, también reciben de los páramos gran parte de su suministro de agua. A semejanza de las cuencas de captación cubierta por glaciares, los ríos alimentados por páramos se caracterizan también por tener un caudal base elevado y sostenido gracias a la elevada capacidad de retención de agua de los suelos⁶⁰.

Los páramos se enfrentan con la amenaza creciente del cambio climático, ya que, con el aumento de la temperatura, los ecosistemas se desplazarán hacia zonas más elevadas de las pendientes, además de sufrir una pérdida de biodiversidad y un mayor aislamiento espacial⁶¹. Las temperaturas más altas también ocasionarán una mayor evapotranspiración, que tendrá como

⁵⁶ Kaser et al., 2010.

⁵⁷ Buytaert et al., 2006.

⁵⁸ Josse et al., 2011; Young et al., 2011.

⁵⁹ Harden, 2006.

⁶⁰ Buytaert et al., 2006.

⁶¹ Buytaert et al., 2011.

consecuencia una menor producción de agua de los páramos. Los futuros cambios en la cantidad de precipitación y su estacionalidad también afectarán los ecosistemas de los páramos al aumentar la sequía del suelo, lo cual alterará la descomposición de la materia orgánica, reducirá la capacidad de retención de agua del suelo y, en consecuencia, podría aumentar la variabilidad del caudal⁶². No obstante, hay factores más importantes en el corto plazo, como la presión demográfica, los cambios en el uso de la tierra inducidos por el hombre y la expansión e intensificación de la agricultura y la ganadería. Ello intensificará la erosión del suelo y aumentará la carga de sedimentos de los ríos, lo que a su vez afectará la calidad y cantidad del agua para consumo urbano y generación de energía hidroeléctrica⁶³.

Se prevé un desplazamiento ascendente de los ecosistemas y la pérdida de la biodiversidad conexas debido al calentamiento proyectado de 3 °C a 5 °C en el siglo XXI⁶⁴. Los páramos son una zona de gran diversidad biológica con varios miles de especies vegetales distintas, muchas de las cuales son endémicas y están adaptadas a esas condiciones climáticas específicas. Dado que a finales de este siglo el clima se asemejará, en esencia, a una situación no análoga (véase el Gráfico 2), la capacidad de adaptación de los ecosistemas andinos se someterá a una dura prueba y es muy probable que muchas especies que no logren migrar cuesta arriba a una velocidad suficiente se extingan⁶⁵. Al mismo tiempo, algunas zonas de vegetación podrían ampliar su hábitat, como lo indica, por ejemplo, la migración ascendente de especies andinas de árboles⁶⁶. Las temperaturas más elevadas también podrían ocasionar la propagación de nuevas especies invasoras y enfermedades a nuevos territorios hasta ahora desocupados⁶⁷.

Por último, el retroceso de los glaciares también puede afectar directamente la composición de especies de los ecosistemas mediante cambios en el suministro de agua aguas abajo. Así sucede, por ejemplo, con los humedales que dependen y se alimentan directamente del agua procedente del deshielo de glaciares (como los bofedales). Las especies acuáticas también podrían verse muy afectadas, pues se perderán las zonas proglaciares con su temperatura y su régimen de caudal característicos cuando los glaciares desaparezcan por completo de una región. Las especies acuáticas adaptadas a estas condiciones son extremadamente vulnerables a la extinción ya que, a diferencia de las especies terrestres, su distribución altitudinal no puede

⁶² Buytaert y Beven, 2011.

⁶³ Buytaert et al., 2006.

⁶⁴ Urrutia y Vuille, 2009.

⁶⁵ Véase, por ejemplo, Anderson et al., 2011.

⁶⁶ Feeley y Silman, 2010.

⁶⁷ Véase, por ejemplo, Seimon et al., 2007.

simplemente desplazarse a mayores altitudes en busca de un hábitat de corriente glaciaria que ya no existe⁶⁸. En los Andes ecuatorianos, por ejemplo, Jacobsen et al. estimaron que de 11% a 38% de las especies regionales, incluidas las endémicas, podrían extinguirse luego de la desaparición total de los glaciares⁶⁹. Desde luego, muchas especies acuáticas, en especial los peces, también son vulnerables a otros efectos del cambio climático y las perturbaciones antropogénicas, como la deforestación, las extracciones de agua, la contaminación del agua, la generación de energía hidroeléctrica o la mayor temperatura del agua a causa del cambio climático⁷⁰. Se calcula que en los Andes existen entre 400 y 600 especies diferentes de peces de agua dulce, de las cuales cerca de 40% son endémicas⁷¹.

3. Tensiones socioeconómicas derivadas de la escasez de agua

El cambio en la estacionalidad del caudal y, en particular, la disminución de las escorrentías fluviales durante la estación seca incidirán en todos los aspectos del uso de agua, desde el acceso a agua potable hasta la disponibilidad de agua para saneamiento, riego y agricultura, operaciones mineras y generación de energía hidroeléctrica⁷².

De hecho, las disminuciones observadas y proyectadas del caudal ya han exacerbado las tensiones, en particular, entre campesinos locales y empresas mineras. Estas tensiones se agravan porque habitualmente las minas se ubican en zonas de cabecera donde el aporte de los glaciares es de suma relevancia y donde se prevén los cambios más evidentes en el caudal. Además, la minería es una actividad impura y altamente contaminante que puede tener un efecto negativo en la calidad del agua para los usuarios aguas abajo⁷³. Huelga decir que la minería es un sector económico fundamental en muchos países andinos, por lo que es improbable que se le relegue en favor de los intereses de las poblaciones indígenas relativos al agua. La agricultura industrial de gran escala en las zonas costeras, sobre todo en Perú, también supone un uso intensivo de agua y se ve favorecida por mecanismos institucionales relacionados primordialmente con los intereses económicos de los estados en productos orientados a la exportación⁷⁴.

⁶⁸ Jacobsen et al., 2010.

⁶⁹ Jacobsen et al., 2012.

⁷⁰ Véase, por ejemplo, Anderson y Maldonado-Ocampo, 2010.

⁷¹ *Ibíd.*

⁷² Vergara et al., 2007.

⁷³ Bebbington y Williams, 2008.

⁷⁴ Lynch, 2012.

De manera similar, la generación de energía hidroeléctrica es el principal sector energético en varios países andinos pues es eficiente y económica dado el contexto topográfico, y tiene una reducida huella de carbono⁷⁵. Se prevé un gran aumento de la generación de energía hidroeléctrica al este de los Andes, donde se planean 151 nuevas presas con más de 2 MW de capacidad en los próximos 20 años, lo que representa un aumento de la generación superior al 300%⁷⁶. Estas presas incluirían a cinco de los seis principales tributarios andinos del Amazonas y podrían tener efectos ecológicos importantes en el nexo entre los Andes y el Amazonas.

Sin embargo, la generación de energía hidroeléctrica en los altos Andes también tiene importantes repercusiones sociales y económicas. Carey et al., por ejemplo, documentan vívidamente el caso de la laguna Parón, en la Cordillera Blanca, donde los agricultores entraron en pugna con una empresa de energía hidroeléctrica en 2008 por la ordenación del agua de un embalse local⁷⁷. En los años ochenta se construyeron un túnel y compuertas en esa laguna para regular su nivel y evitar así una inundación repentina relacionada con el clima que podría haber amenazado a los poblados y la infraestructura ubicados en zonas más bajas. Esta construcción fue una adaptación exitosa al cambio climático, pero la posibilidad de regular el flujo natural del agua del embalse dio origen a deseos y prioridades muy distintos de las partes interesadas— como los agricultores de zonas rurales, los residentes urbanos, los promotores turísticos, los funcionarios del Parque Nacional y la empresa hidroeléctrica— en cuanto a la ordenación del agua. Estas pugnas, que se prolongaron por décadas, propiciaron al fin y al cabo que se organizara una coalición de grupos de la comunidad local que arrebataría el control del embalse a una importante empresa multinacional de energía eléctrica. A finales de 2011 el conflicto aún no se había resuelto y la Autoridad Nacional del Agua de Perú llevaba a cabo estudios para determinar quién debía participar en la ordenación de la laguna y regular su descarga en el futuro⁷⁸.

Casos como éste se suman a la creciente preocupación de que, en el futuro, la escasez de agua podría intensificar la lucha por el poder para obtener acceso al agua y reglamentarla, y que el resultado final sea el desplazamiento de la población local y de prácticas centenarias relacionadas con el uso del agua⁷⁹. Por consiguiente, es de fundamental importancia que los

⁷⁵ Vergara et al., 2007.

⁷⁶ Finer y Jenkins, 2012.

⁷⁷ Carey et al., 2012.

⁷⁸ *Ibíd.*

⁷⁹ Carey, 2010.

gobiernos regionales y nacionales documenten y atiendan estos casos cuando se están analizando y regulando los usos y la distribución del agua, así como las cuestiones relativas a su acceso y control. Históricamente, las relaciones de poder desiguales (por ejemplo, las empresas mineras o de energía hidroeléctrica frente a los campesinos locales) han contribuido a configurar políticas gubernamentales que determinan quién tiene el control del agua y acceso a ella⁸⁰. Se ha ejercido un considerable poder político de esa manera, por ejemplo, en Ecuador o Perú, lo que redundó en una renegociación de las reglas para la ordenación del agua, reemplazando efectivamente prácticas informales extendidas y usos tradicionales vigentes durante siglos⁸¹. Por estos motivos, a lo largo de la historia la protección los de usuarios de agua vulnerables no ha sido una prioridad para las naciones andinas⁸².

Un aspecto que podría aliviar parte de la presión es la capacidad de la población andina para adaptarse a la escasez de agua. La resistencia al cambio ambiental guarda una estrecha relación no solo con la percepción humana del cambio, sino también con las actividades sociales, la capacidad de adaptación y las estrategias de respuesta ante situaciones de cambio climático presentes y futuras. Aunque son insuficientes los conocimientos actuales sobre la resistencia de los hogares locales y su capacidad para adaptarse a tales alteraciones en la disponibilidad del agua, varios estudios demuestran que las comunidades locales de los Andes realmente se están adaptando de diversas maneras.

Como lo exponen Bury et al., los agricultores del poblado de Catac, ubicado en la Cordillera Blanca, han observado un menor suministro de agua durante la estación seca que perjudica sus cultivos y su productividad agrícola⁸³. Esta reducción del suministro de agua también ha afectado a su ganado debido a la disminución de la pastura y la productividad de los pastos y los obligó a hacer mayores desplazamientos verticales diarios en busca de lechos fluviales con un caudal suficiente. Como lo indican los entrevistados locales, esto ha disminuido las tasas de crecimiento del ganado y afectado negativamente las poblaciones de peces. El 91% de las personas entrevistadas por Bury et al. señalaron que estaban muy preocupadas por los cambios climáticos recientes de la región⁸⁴.

⁸⁰ Véase, por ejemplo, Carey et al., 2012.

⁸¹ Crabtree, 2002; Carey, 2010.

⁸² Lynch, 2012.

⁸³ Bury et al., 2011.

⁸⁴ *Ibíd.*

Los medios de vida también pueden verse afectados por el cambio climático en regiones donde el ciclo hidrológico quizá no sufra alteraciones. Por ejemplo, se ha demostrado que en algunas zonas las temperaturas más cálidas han redundado en una ampliación ascendente del límite superior de las tierras que potencialmente podrían cultivarse, lo que ha conducido a la irónica situación de que ahora se puedan cultivar más tierras y, en consecuencia, se requiera aún más agua⁸⁵. Según las proyecciones, también como resultado de las temperaturas más elevadas, las fechas de siembra y cosecha podrían ser más tempranas y los ciclos de cultivo más cortos, pero en términos generales la producción será menor, en particular en el caso de ciertos cultivos de papa⁸⁶.

Estas pugnas por el acceso a una cantidad suficiente de agua tienen que abordarse en el contexto del crecimiento demográfico en la región andina, que aumentará la presión sobre los recursos. De hecho, los problemas relacionados con el cambio climático y los efectos en los recursos hídricos son motivo de preocupación principalmente en las regiones donde las grandes presiones demográficas y una actividad económica considerable se yuxtaponen a los grandes cambios previstos en la disponibilidad del agua, intensificando de esta forma la competencia por los derechos sobre el agua. Recientemente, Buytaert y De Bievre, por ejemplo, afirmaron que los cambios demográficos en las principales ciudades andinas pueden ser más pertinentes en este contexto que los cambios en el clima, simplemente debido a la velocidad del crecimiento de la población, que quizá esté superando el efecto del cambio climático en los recursos hídricos⁸⁷. Sin embargo, en vista de las grandes incertidumbres en toda proyección de cambio climático, estos resultados tendrán que reevaluarse cuando se disponga de mejores cálculos sobre los casos hipotéticos de futuro cambio climático en esta región. Por otro lado, en el estudio no se consideran los efectos en las poblaciones rurales que viven cerca de las cuencas cubiertas por glaciares, que probablemente sean las más afectadas. Sin embargo, existe cierta preocupación de que la futura escasez de agua en algunas zonas disminuya la capacidad de retención de agua de la tierra e induzca la migración de grandes segmentos de la población rural a centros urbanos, lo que incrementaría aún más la presión sobre el agua en las ciudades andinas.

⁸⁵ Hole et al., 2011.

⁸⁶ Sanabria y Lhomme, 2012.

⁸⁷ Buytaert y De Bievre, 2012.

4. Desafíos del futuro

Los problemas actuales en torno a la disponibilidad del agua en los Andes tropicales, sumados a las proyecciones de retroceso de los glaciares en el futuro, las posibles reducciones en las precipitaciones y el crecimiento demográfico continuo, requieren que rápidamente se formulen y apliquen estrategias de adaptación y mitigación, que podrían ayudar a aliviar, tanto a corto como a mediano plazo, los conflictos relativos al acceso a agua salubre. La meta principal de tales iniciativas de adaptación debería ser aumentar la resistencia y reducir la vulnerabilidad de las poblaciones indígenas locales, que probablemente sean las más afectadas por las repercusiones futuras del cambio climático en el ciclo hidrológico.

Desafortunadamente, los diferentes grupos que participan en estas discusiones han estado siempre desconectados, lo que ha planteado un gran desafío y un impedimento para avanzar con esa agenda. Los estudios científicos, por ejemplo, hasta ahora han contribuido poco a la mejora de la comprensión predictiva de la oferta y la demanda futuras de agua en la región andina y, por lo tanto, prácticamente no han tenido ningún efecto en la mejora de los medios de subsistencia de las poblaciones afectadas. Todavía no comprendemos cabalmente la importancia espacialmente variable de los glaciares en diferentes partes de los Andes. Lo mismo ocurre con los ecosistemas aguas abajo de los glaciares y su posible pertinencia para regular el abastecimiento de agua. Hasta ahora, los estudios científicos tampoco han proporcionado parámetros de medición útiles para la planificación que podrían servir como lineamientos para los las personas a cargo de ordenar los recursos hídricos y otros responsables de tomar decisiones. Gran parte de esta falta de avance tiene que ver con las limitaciones impuestas por una red de vigilancia ambiental a menudo inadecuada en la región⁸⁸. Los estudios de modelización adolecen de grandes incertidumbres en lo concerniente a cambios en el ciclo hidrológico⁸⁹ y muchos organismos de financiamiento se han mostrado renuentes a invertir en investigaciones del impacto a pesar de que esa es la única manera de idear y elaborar mejores técnicas y casos hipotéticos de reducción de escala.

Por consiguiente, los proyectos de adaptación suelen avanzar sin haber recibido una orientación apropiada de la comunidad científica. Hasta cierto punto ello obedece a la reticencia de los científicos a comunicar sus resultados científicos en un lenguaje comprensible para las

⁸⁸ Coudrain et al., 2005; Casassa et al., 2007.

⁸⁹ Buytaert et al., 2010.

diversas partes interesadas y hacerlos accesibles para todos los que participan en el proceso de adaptación⁹⁰. Como resultado, algunos planes —por ejemplo, pintar de blanco las cimas de las montañas para disminuir el albedo e inducir artificialmente el crecimiento de los glaciares— proceden sin una evaluación científica adecuada. De manera similar, muchas veces los proyectos de adaptación no reconocen las estrategias locales de adaptación que ya existen, de modo que no aprovechan los conocimientos locales tradicionales en la medida que podrían hacerlo. Un mejor marco de apoyo para mecanismos, iniciativas y tradiciones locales y regionales permitiría una mejor integración de las diversas partes afectadas no solo por el cambio climático, sino también por los proyectos de adaptación planificados. Hasta ahora, a menudo no se ha tenido en cuenta la participación adecuada de los grupos más vulnerables, a saber, las comunidades indígenas rurales.

Esta falta de diálogo entre las diferentes partes interesadas ha representado un importante obstáculo para lograr un avance real en términos de soluciones aplicadas en la región. La Red Interamericana de Observatorios del Cambio Climático en los Andes (ACCION), iniciativa reciente financiada por el Departamento de Estado de Estados Unidos⁹¹, está trabajando para mejorar la coordinación y el intercambio de datos entre los interesados directos y entre distintas disciplinas, con la esperanza de promover sinergias, el diálogo y la colaboración y de aumentar al máximo la efectividad de los recursos financieros, que suelen ser bastante limitados. Un aspecto decisivo de este proyecto es el reconocimiento de que, para que haya un avance real en la región, es necesario mejorar la educación y crear capacidad en todos los niveles, así como promover el intercambio de pericia científica. Esto se logrará mediante becas de investigación, así como de la capacitación y educación de estudiantes sudamericanos en instituciones asociadas de los Estados Unidos y Europa.

En países andinos se están realizando varios talleres sobre hidrología de los glaciares y cambio climático para capacitar a jóvenes científicos, administradores y educadores. La distribución de herramientas didácticas y materiales sobre recursos hídricos para niños en edad escolar permitirá divulgar información ambiental en el aula, mientras que los documentos de política y los folletos en papel satinado ayudarán a informar a los responsables de formular políticas y tomar decisiones. Sin embargo, en última instancia, estas actividades deben tener bases más sostenibles con un financiamiento continuo garantizado; de lo contrario, existe el

⁹⁰ Viviroli et al., 2011.

⁹¹ Véase www.ecpamericas.org/Initiatives/default.aspx?id=74.

riesgo de que estas iniciativas se implementen brevemente sin tener el efecto multiplicador deseado de un impacto prolongado y sostenido.

En algunos casos, las soluciones técnicas podrían aliviar una parte de la escasez de agua, ya sea mediante la construcción de pequeños embalses, la reducción del volumen de agua contaminada que no se utiliza instalando plantas de tratamiento, el aprovechamiento de nuevos recursos de aguas subterráneas o la simple instalación de sistemas privados de almacenamiento de agua⁹². Sin embargo, con frecuencia la aplicación de este tipo de medidas se ve obstaculizada por la falta de conocimientos sobre la disponibilidad, calidad y dinámica del agua. La comprensión de procesos físicos fundamentales de flujo, almacenamiento y calidad del agua en muchas cuencas de captación es deficiente. Por ejemplo, históricamente se ha considerado que la contribución de las aguas subterráneas es insignificante en los valles con glaciares, en vista del alto relieve y las empinadas cuestas, pero la verdadera función de los acuíferos y sus tasas de recarga prácticamente se desconocen. . Además, en las construcciones nuevas, como los embalses, habría que tener en cuenta los efectos negativos, como la pérdida de tierras, las pérdidas de agua como consecuencia de la evaporación, el posible desplazamiento de la población local y la menor vida útil de los embalses en las cuencas glaciares debido a las altas tasas de sedimentación. La conservación del agua, los nuevos métodos de riego y los proyectos de saneamiento también podrían proporcionar cierto alivio en algunas regiones. Los nuevos proyectos de riego por goteo en las zonas costeras de Perú, por ejemplo, solo usan una pequeña fracción del agua destinada a los proyectos de riego tradicionales.

Por último, es importante fortalecer la posición institucional de las autoridades que realizan investigaciones sobre los glaciares y la ordenación del agua. En algunos casos podría ser necesario modificar las instituciones de gobernanza ambiental o bien crear nuevas entidades para atender mejor los cambiantes requerimientos de ordenación del agua. No obstante, los mecanismos institucionales tendrán que incluir una participación significativa de las poblaciones locales afectadas en la ordenación de cuencas hidrográficas para evitar conflictos y la competencia por el agua entre sectores económicos⁹³.

Al fin y al cabo, solo la combinación de distintos enfoques permitirá reducir la vulnerabilidad y aumentar la resistencia de los usuarios del agua afectados por el cambio

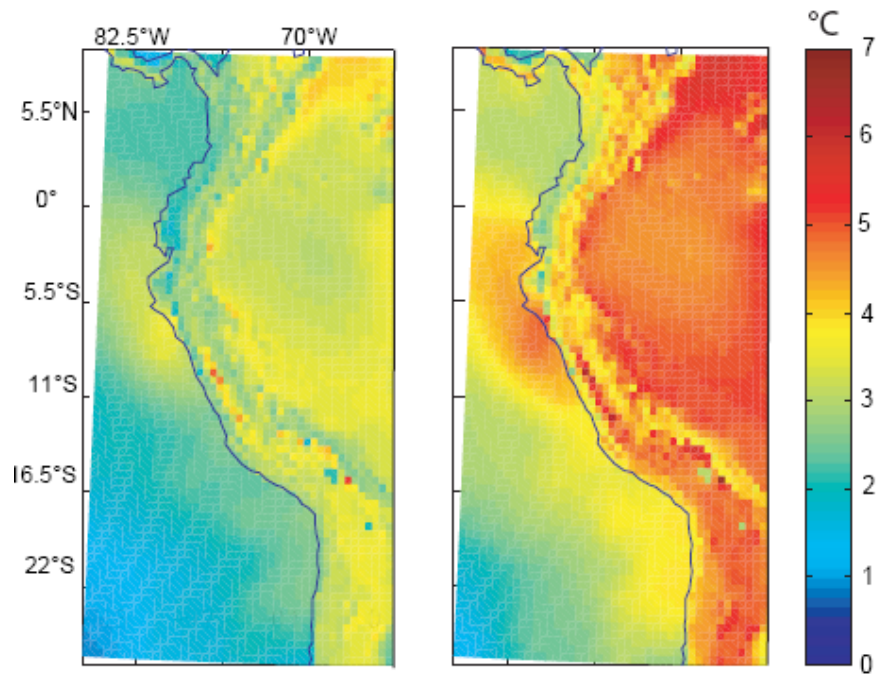
⁹² Véase, por ejemplo, Jeschke et al., 2012.

⁹³ Lynch, 2012.

climático. Considerando la escala y la complejidad del problema, la colaboración y la asociación entre todos los actores y partes interesadas revisten una importancia crucial. Esta es la única manera de avanzar hacia un futuro más sostenible en los Andes tropicales, un futuro en que se garantice un acceso suficiente a agua salubre y la distribución del agua atienda las preocupaciones de todos los usuarios del agua.

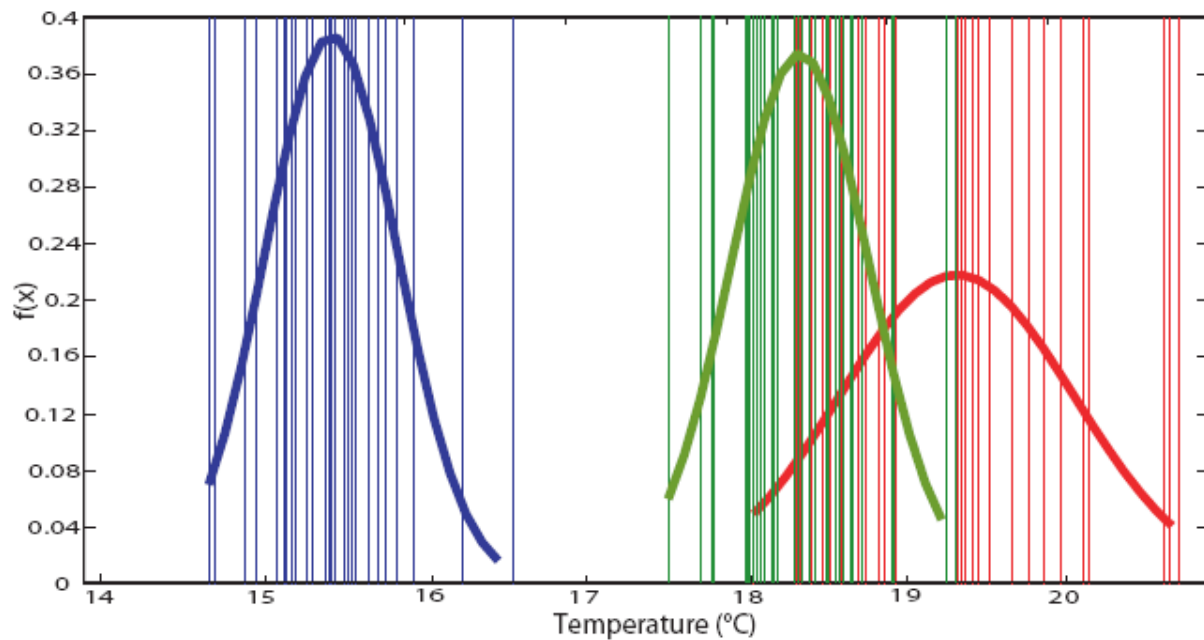
Gráficos

Gráfico 1. Aumento de la temperatura superficial media anual en los Andes tropicales para el período 2071–2100 en comparación con el período 1961–1990 en una simulación de un modelo climático regional basado en casos hipotéticos de bajo nivel de emisiones (B2, izquierda) y alto nivel de emisiones (A2, derecha) del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). El nivel de calentamiento (en °C) se indica con la barra vertical de la derecha.



Fuente: Modificado de Urrutia y Vuille, 2009.

Gráfico 2. Función de densidad de probabilidad para la temperatura media anual en los períodos 1961–1990 (azul) y 2071–2100 en los casos hipotéticos B2 (verde) y A2 (rojo) a lo largo de la vertiente occidental de los Andes tropicales. Las líneas verticales delgadas representan la temperatura media anual en cada uno de los 30 años de cada simulación.



Fuente: Modificado de Urrutia y Vuille, 2009.

Gráfico 3. Desaparición del glaciar Espejo en Pico Bolívar (Venezuela), según se documenta en fotos de 1910 (izquierda), 1988 (centro) y 2008 (derecha).



Fuente: Las fotos son cortesía de Eduardo Carillo.

Referencias

- Ames, A. 1998. A documentation of glacier tongue variations and lake development in the Cordillera Blanca, Peru. *Zeitschrift fuer Gletscherkunde und Glazialgeologie* 34(1): 1–36.
- Ames, A., S. Dolores, A. Valverde, C. Evangelista, D. Javier, W. Ganwini y J. Zuniga. 1989. *Glacier Inventory of Peru, Part I*. Hidrandina S.A. Huaraz, Perú.
- Anderson, E. P. y J. A. Maldonado-Ocampo. 2010. A regional perspective on the diversity and conservation of tropical Andean fishes. *Conservation Biology* 25(1): 30–39.
- Anderson, E. P., J. Marengo, R. Villalba, S. Halloy, B. Young, D. Cordero, F. Gast, E. Jaimes y D. Ruiz. 2011. Consequences of climate change for ecosystems and ecosystem services in the tropical Andes. En S. K. Herzog, R. Martínez, P. M. Jørgensen y H. Tiessen (comps.), *Climate Change and Biodiversity in the Tropical Andes*. São José dos Campos y París: Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global y Comité Científico sobre Problemas del Medio Ambiente.
- Baraer, M., B. G. Mark, J. M. McKenzie, T. Condom, J. Bury, K. Huh, C. Portocarrero, J. Gómez y S. Rathay. 2012. Glacier recession and water resources in Peru's Cordillera Blanca. *Journal of Glaciology* 58(207): 134–150.
- Bebbington, A. y M. Williams. 2008. Water and mining conflicts in Peru. *Mountain Research and Development* 28(3/4): 190–195.
- Bradley, R. S., F. T. Keimig y H. F. Diaz. 2004. Projected temperature changes along the American cordillera and the planned GCOS network. *Geophysical Research Letters* 31: L16210.
- Bradley, R. S., M. Vuille, H. F. Diaz y W. Vergara. 2006. Threats to water supplies in the tropical Andes. *Science* 312: 1755–1756.
- Bradley, R. S., F. T. Keimig, H. F. Diaz y D. R. Hardy. 2009. Recent changes in freezing level heights in the tropics with implications for the deglaciation of high mountain regions. *Geophysical Research Letters* 36: L17701.
- Brecher, H. H. y L. G. Thompson. 1993. Measurement of the retreat of Qori Kalis glacier in the tropical Andes of Peru by terrestrial photogrammetry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 59(6): 1017–1022.

- Bury, J. T., B. G. Mark, J. M. Mckenzie, A. French, M. Baraer, K. I. Huh, M. A. Zapata y R. J. Gómez. 2011. Glacier recession and human vulnerability in the Yanamarey watershed of the Cordillera Blanca, Peru. *Climatic Change* 105: 179–206.
- Buytaert, W. y K. Beven. 2011. Models as multiple working hypotheses: Hydrological simulation of tropical alpine wetlands. *Hydrological Processes* 25: 1784–1799.
- Buytaert, W. y B. de Bievre. 2012. Water for cities: The impact of climate change and demographic growth in the tropical Andes. *Water Resources Research* 48: W08503.
- Buytaert, W., R. Celleri, B. De Bievre, F. Cisneros, G. Wyseure, J. Deckers y R. Hofstede. 2006. Human impact on the hydrology of the Andean paramos. *Earth Science Reviews* 79: 53–72.
- Buytaert, W., M. Vuille, A. DeWulf, R. Urrutia, A. Karmalkar y R. Celleri. 2010. Uncertainties in climate change projections and regional downscaling in the tropical Andes: Implications for water resources management. *Hydrology and Earth System Science* 14: 1247–1258.
- Buytaert, W., F. Cuesta-Camacho y C. Tobon. 2011. Potential impacts of climate change on the environmental services of humid tropical alpine regions. *Global Ecology and Biogeography* 20: 19–33.
- Cáceres, B. 2011. Presentación en el taller regional “Derretimiento de nieves y glaciares: ciencia, tecnología y políticas para enfrentar los desafíos de la región andina en un contexto de cambio climático”. Ministerio de Relaciones Exteriores, Santiago, Chile, del 13 al 15 de septiembre.
- Carey, M. 2010. *In the Shadow of Melting Glaciers: Climate Change and Andean Society*. Oxford University Press.
- Carey, M., A. French y E. O’Brien. 2012. Unintended effects of technology on climate change adaptation: An historical analysis of water conflicts below Andean glaciers. *Journal of Historical Geography* 38: 181–91.
- Carillo, E. 2011. Presentación en el taller regional “Derretimiento de nieves y glaciares: ciencia, tecnología y políticas para enfrentar los desafíos de la región andina en un contexto de cambio climático”. Ministerio de Relaciones Exteriores, Santiago, Chile, del 13 al 15 de septiembre.

- Casassa, G., W. Haeberli, G. Jones, G. Kaser, P. Ribstein, A. Rivera y C. Schneider. 2007. Current status of Andean glaciers. *Global and Planetary Change* 59(1–4): 1–9.
- Ceballos, J. L., C. Euscategui, J. Ramírez, M. Canon, C. Huggel, W. Haeberli y H. Machguth. 2006. Fast shrinkage of tropical glaciers in Colombia. *Annales of Glaciology* 43: 194–201.
- Coudrain, A., B. Francou y Z. W. Kundzewicz. 2005. Glacier shrinkage in the Andes and consequences for water resources. *Hydrological Sciences Journal* 50(6): 925–932.
- Crabtree, J. 2002. The impact of neo-liberal economics on Peruvian peasant agriculture in the 1990s. *Latin American Peasants* 29(3–4): 131–161.
- Favier, V., P. Wagnon, J.-P. Chazarin, L. Maisincho y A. Coudrain. 2004. One-year measurements of surface heat budget on the ablation zone of Antizana glacier 15, Ecuadorian Andes. *Journal of Geophysical Research* 109: D18105.
- Feeley, K. J. y M. R. Silman. 2010. Land use and climate change effects on population size and extinction risk of Andean plants. *Global Change Biology* 16(12): 3215–3122.
- Finer, M. y C. N. Jenkins. 2012. Proliferation of hydroelectric dams in the Andean Amazon and implications for Andes-Amazon connectivity. *PLOS ONE* 7(4): e35126.
- Francou, B., E. Ramírez, B. Cáceres y J. Mendoza. 2000. Glacier evolution in the tropical Andes during the last decades of the 20th century: Chacaltaya, Bolivia and Antizana, Ecuador. *Ambio* 29(7): 416–422.
- Francou, B., M. Vuille, P. Wagnon, J. Mendoza y J. E. Sicart. 2003. Tropical climate change recorded by a glacier in the central Andes during the last decades of the twentieth century: Chacaltaya, Bolivia, 168S. *Journal of Geophysical Research* 108(D5): 4154.
- Francou, B., M. Vuille, V. Favier y B. Cáceres. 2004. New evidence for an ENSO impact on low latitude glaciers: Antizana 15, Andes of Ecuador, 0°28'S. *Journal of Geophysical Research* 109: D18106.
- Garreaud, R. D. y P. Aceituno. 2001. Interannual rainfall variability over the South American Altiplano. *Journal of Climate* 14: 2779–2789.
- Garreaud, R., M. Vuille y A. Clement. 2003. The climate of the Altiplano: Observed current conditions and mechanisms of past changes. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* 194: 5–22.

- Garreaud, R. D., M. Vuille, R. Compagnucci y J. Marengo. 2009. Present-day South American climate. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* 281: 180–195.
- Georges, C. 2004. The 20th century glacier fluctuations in the tropical Cordillera Blanca, Peru. *Arctic Antarctic and Alpine Research* 36(1): 100–107.
- Harden, C. P. 2006. Human impacts on headwater fluvial systems in the northern and central Andes. *Geomorphology* 79(3–4): 249–263.
- Hastenrath, S. y A. Ames. 1995. Recession of Yanamarey glacier in Cordillera Blanca, Peru during the 20th century. *Journal of Glaciology* 41(137): 191–196.
- Haylock, M.R., T.C. Peterson, L. M. Alves, T. Ambrizzi, M. T. Anunciacao, J. Baez, V. R. Barros, M. A. Berlato, M. Bidegain, G. Coronel, V. Corradi, V. J. García, A. M. Grimm, D. Karoly, J. A. Marengo, M. B. Marino, D. F. Moncunill, D. Nechet, J. Quintana, E. Rebello, M. Rusticucci, J. L. Santos, I. Trebejo y L. A. Vincent. 2006. Trends in total and extreme South American rainfall in 1960-2000 and links with sea surface temperature. *Journal of Climate* 19: 1490–1512.
- Hole, D. G., K. R. Young, A. Seimon, C. G. Wichtendahl, D. Hoffmann, K. Schutze Paez, S. Sanchez, D. Muchoney, H. R. Grau y E. Ramírez. 2011. Adaptive management for biodiversity conservation under climate change—A tropical Andean perspective. En S. K. Herzog, R. Martínez, P. M. Jørgensen y H. Tiessen (comps.), *Climate Change and Biodiversity in the Tropical Andes*. São José dos Campos y París: Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global y Comité Científico sobre Problemas del Medio Ambiente.
- Jacobsen, D., O. Dangles, P. Andino, R. Espinosa, L. Hamerlik y E. Cadier. 2010. Longitudinal zonation of macroinvertebrates in an Ecuadorian glacier-fed stream: Do tropical glacial systems fit the temperate model? *Freshwater Biology* 55: 1234–1248.
- Jacobsen, D., A. M. Milner, L. E. Brown y O. Dangle. 2012. Biodiversity under threat in glacier-fed river systems. *Nature Climate Change* 2: 361–364.
- Jeschke, M., A. Popp y H. Lotze-Campen. 2012. Adaptation options to climate-induced glacier retreat in Bolivia. En O. Edenhofer, J. Wallacher, H. Lotze-Campen, M. Reder, B. Knopf, y J. Müller (comps.). *Climate Change, Justice and Sustainability*, 195–204. Nueva York: Springer.

- Jomelli, V., V. Favier, A. Rabatel, D. Brunstein, G. Hoffmann y B. Francou. 2009. Fluctuations of glaciers in the tropical Andes over the last millennium and paleoclimatic implications: A review. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* 281(3–4): 269–282.
- Jomelli, V., M. Khodri, V. Favier, D. Brunstein, M.-P. Ledru, P. Wagnon, P. H. Blard, J. E. Sicart, R. Braucher, D. Grancher, D. Bourlès, P. Braconnot y M. Vuille. 2011. Irregular tropical glacier retreat over the Holocene driven by progressive warming. *Nature* 474: 196–199.
- Jordan, E., L. Ungerechts, B. Cáceres, A. Penafiel y B. Francou. 2005. Estimation by photogrammetry of the glacier recession on the Cotopaxi volcano (Ecuador) between 1956 and 1997. *Hydrological Sciences Journal* 50(6): 949–961.
- Josse, C., F. Cuesta, G. Navarro, V. Barrena, M. T. Becerra, E. Cabrera, E. Chacón-Moreno, W. Ferreira, M. Peralvo, J. Saito, A. Tovar y L. G. Naranjo. 2011. Physical geography and ecosystems in the Tropical Andes. En S. K. Herzog, R. Martínez, P. M. Jørgensen y H. Tiessen (comps.), *Climate Change and Biodiversity in the Tropical Andes*. São José dos Campos y París: Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global y Comité Científico sobre Problemas del Medio Ambiente.
- Juen, I., G. Kaser y C. Georges. 2007. Modeling observed and future runoff from a glacierized tropical catchment (Cordillera Blanca, Perú). *Global and Planetary Change* 59(1–4): 37–48.
- Kaser, G., C. Georges y A. Ames. 1996. Modern glacier fluctuations in the Huascarán-Chopicalqui-massif of the Cordillera Blanca, Peru. *Zeitschrift fuer Gletscherkunde und Glazialgeologie* 32: 91–99.
- Kaser, G., I. Juen, C. Georges, J. Gómez y W. Tamayo. 2003. The impact of glaciers on the runoff and the reconstruction of mass balance history from hydrological data in the tropical Cordillera Blanca, Peru. *Journal of Hydrology* 282(1–4): 130–144.
- Kaser, G., M. Grosshauser y B. Marzeion. 2010. Contribution potential of glaciers to water availability in different climate regimes. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107(47): 20223–20227.

- Lavado Casimiro, W. S., D. Labat, J. Ronchail, J. C. Espinoza y J. L. Guyot. 2012. Trends in rainfall and temperature in the Peruvian Amazon-Andes basin over the last 40 years (1965–2007). *Hydrological Sciences Journal*. DOI: 10.1002/hyp.9418.
- Lynch, B. D. 2012. Vulnerabilities, competition and rights in a context of climate change toward equitable water governance in Peru's Rio Santa Valley. *Global Environmental Change* 22: 364–373.
- Mark, B. G. 2002. Hot ice: Glaciers in the tropics are making the press. *Hydrological Processes* 16: 3297–3302.
- Mark, B. G. y J. M. McKenzie. 2007. Tracing increasing tropical Andean glacier melt with stable isotopes in water. *Environmental Science and Technology* 41(20): 6955–6960.
- Mark, B. G. y G. O. Seltzer. 2005. Evaluation of recent glacier recession in the Cordillera Blanca, Peru (AD 1962–1999): Spatial distribution of mass loss and climatic forcing. *Quaternary Science Reviews* 24: 2265–2280.
- Mark, B. G., J. M. McKenzie y J. Gómez. 2005. Hydrochemical evaluation of changing glacier meltwater contribution to stream discharge: Callejon de Huaylas, Peru. *Hydrological Sciences Journal* 50(6): 975–987.
- Mark, B. G., J. Bury, J. M. McKenzie, A. French y M. Baraer. 2010. Climate change and tropical Andean glacier recession: Evaluating hydrologic changes and livelihood vulnerability in the Cordillera Blanca, Peru. *Annals of the Association of American Geographers* 100(4): 794–805.
- Minvielle, M. y R. Garreaud. 2011. Projecting rainfall changes over the South American Altiplano. *Journal of Climate* 24: 4577–4583.
- Poveda, G. y K. Pineda. 2009. Reassessment of Colombia's tropical glaciers retreat rates: Are they bound to disappear during the 2010-2020 decade? *Advances in Geosciences* 22: 107–116.
- Poveda, G., W. Rojas, M. L. Quiñones, I. D. Vélez, R. I. Mantilla, D. Ruiz, J. S. Zuluaga y G. L. Rúa. 2001. Coupling between annual and ENSO timescales in the malaria-climate association in Colombia. *Environmental Health Perspectives* 109: 489–494.

- Rabatel, A., A. Machaca, B. Francou y V. Jomelli. 2006. Glacier recession on Cerro Charquini (16°S), Bolivia since the maximum of the Little Ice Age (17th century). *Journal of Glaciology* 52(176): 110–118.
- Rabatel, A., B. Francou, A. Soruco, J. Gómez, B. Cáceres, J. L. Ceballos, R. Basantes, M. Vuille, J.-E. Sicart, C. Huggel, M. Scheel, Y. Lejeune, Y. Arnaud, M. Collet, T. Condom, G. Consoli, V. Favier, V. Jomelli, R. Galarraga, P. Ginot, L. Maisincho, J. Mendoza, M. Ménégos, E. Ramírez, P. Ribstein, W. Suarez, M. Villacis y P. Wagnon. En preparación. Current state of glaciers in the tropical Andes: A multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere*.
- Racoviteanu, A. E., W. Manley, Y. Arnaud y M. W. Williams. 2007. Evaluating digital elevation models for glaciologic applications: An example from Nevado Coropuna, Peruvian Andes. *Global and Planetary Change* 59(1–4): 110–125.
- Racoviteanu, A. E., Y. Arnaud, M. W. Williams y J. Ordoñez. 2008. Decadal changes in glacier parameters in the Cordillera Blanca, Peru, derived from remote sensing. *Journal of Glaciology* 34(186): 499–510.
- Ramírez, E., B. Francou, P. Ribstein, M. Descloitres, R. Guerin, J. Mendoza, R. Gallaire, B. Pouyaud y E. Jordan. 2001. Small glaciers disappearing in the tropical Andes: A case study in Bolivia: Glaciar Chacaltaya (16°S). *Journal of Glaciology* 47(157): 187–194.
- Raup, B., A. Racoviteanu, S. J. S. Khalsa, C. Helm, R. Armstrong y Y. Arnaud. 2006. The GLIMS geospatial glacier database: A new tool for studying glacier change. *Global and Planetary Change* 56(1–2): 101–110.
- Ribstein, P., E. Tiriau, B. Francou y R. Saravia. 1995. Tropical climate and glacier hydrology: A case study in Bolivia. *Journal of Hydrology* 165: 221–234.
- Sanabria, J. y J. P. Lhomme. 2012. Climate change and potato cropping in the Peruvian Altiplano. *Theoretical and Applied Climatology*. DOI 10.1007/s00704-012-0764-1.
- Schubert, C. 1992. The glaciers of the Sierra Nevada de Mérida (Venezuela), a photographic comparison of recent deglaciation. *Erdkunde* 46: 58–64.
- Schubert, C. 1998. Glaciers of Venezuela. En R. S. Williams y J. G. Ferrigno (comps.), *Satellite Image Atlas of the Glaciers of the World—South America*. USGS Professional Paper 1386-I: 81–108.

- Seimon, T. A., A. Seimon, P. Daszak, S. R. P. Halloy, L. M. Schloegel, C. A. Aguiar, P. Sowell, A. D. Hyatt, B. Konecky y J. E. Simmons. 2007. Upward range extension of Andean anurans and chytridiomycosis to extreme elevations in response to tropical deglaciation. *Global Change Biology* 13: 288–299.
- Silverio, W. y J.-M. Jaquet. 2012. Multi-temporal and multi-source cartography of the glacial cover of nevado Coropuna (Arequipa, Peru) between 1955 and 2003. *International Journal of Remote Sensing* 33(18): 5876–5888.
- Soruco, A., C. Vincent, B. Francou y J. F. González. 2009a. Glacier decline between 1963 and 2006 in the Cordillera Real, Bolivia. *Geophysical Research Letters* 36: L03502.
- Soruco, A., C. Vincent, B. Francou, P. Ribstein, T. Berger, J. E. Sicart, P. Wagnon, Y. Arnaud, V. Favier y Y. Lejeune. 2009b. Mass balance of Glaciar Zongo, Bolivia, between 1956 and 2006, using glaciological, hydrological and geodetic methods. *Annals of Glaciology* 50.
- Thibeault, J. M., A. Seth y M. García. 2010. Changing climate in the Bolivian Altiplano: CMIP3 projections for temperature and precipitation extremes. *Journal of Geophysical Research* 115: D08103.
- Thompson, L. G., E. Mosley-Thompson, H. Brecher, M. Davis, B. Leon, D. Les, P.-N. Lin, T. Mashiotta y K. Mountain. 2006. Abrupt tropical climate change: Past and present. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 103(28): 10536–10543.
- Urrutia, R. y M. Vuille. 2009. Climate change projections for the tropical Andes using a regional climate model: Temperature and precipitation simulations for the end of the 21st century. *Journal of Geophysical Research* 114: D02108.
- Vergara, W., A. M. Deeb, A. M. Valencia, R. S. Bradley, B. Francou, A. Zarzar, A. Grünwaldt y S. M. Haeussling. 2007. Economic impacts of rapid glacier retreat in the Andes. *EOS* 88(25): 261–264.
- Viviroli, D., D. Archer, W. Buytaert, H. J. Fowler, G. B. Greenwood, A. F. Hamlet, Y. Huang, G. Koboltschnig, M. I. Litaor, J. I. Lopez-Moreno, S. Lorentz, B. Schaedler, H. Schreier, K. Schwaiger, M. Vuille y R. Woods. 2011. Climate change and mountain water resources: Overview and recommendations for research management and policy. *Hydrology and Earth System Sciences* 15: 471–504.

- Vuille, M. 1999. Atmospheric circulation over the Bolivian Altiplano during dry and wet periods and extreme phases of the Southern Oscillation. *International Journal of Climatology* 19: 1579–1600.
- Vuille, M. y R. S. Bradley. 2000. Mean annual temperature trends and their vertical structure in the tropical Andes. *Geophysical Research Letters* 27: 3885–3888.
- Vuille, M. y F. Keimig. 2004. Interannual variability of summertime convective cloudiness and precipitation in the central Andes derived from ISCCP-B3 data. *Journal of Climate* 17: 3334–3348.
- Vuille, M., R. S. Bradley y F. Keimig. 2000a. Climate variability in the Andes of Ecuador and its relation to tropical Pacific and Atlantic sea surface temperatures anomalies. *Journal of Climate* 13: 2520–2535.
- Vuille, M., R. S. Bradley y F. Keimig. 2000b. Interannual climate variability in the Central Andes and its relation to tropical Pacific and Atlantic forcing. *Journal of Geophysical Research* 105: 12447–12460.
- Vuille, M., R. S. Bradley, M. Werner y F. Keimig. 2003. 20th century climate change in the tropical Andes: Observations and model results. *Climatic Change* 59(1–2): 75–99.
- Vuille, M., B. Francou, P. Wagnon, I. Juen, G. Kaser, B. G. Mark y R. S. Bradley. 2008a. Climate change and tropical Andean glaciers—Past, present and future. *Earth Science Reviews* 89: 79–96.
- Vuille, M., G. Kaser y I. Juen. 2008b. Glacier mass balance variability in the Cordillera Blanca, Peru and its relationship with climate and the large-scale circulation. *Global and Planetary Change* 62(1–2): 14–28.
- Young, K. R. y J. K. Lipton. 2006. Adaptive governance and climate change in the tropical highlands of western South America. *Climatic Change* 78: 63–102.
- Young, B. E., K. R. Young y C. Josse. 2011. Vulnerability of tropical Andean ecosystems to climate change. En S. K. Herzog, R. Martínez, P. M. Jørgensen y H. Tiessen (comps.), *Climate Change and Biodiversity in the Tropical Andes*. São José dos Campos y París: Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global y Comité Científico sobre Problemas del Medio Ambiente.