



GLACIARES DE ROCA Y CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS ANDES BOLIVIANOS

Cartografía de nuevos recursos hídricos

SALLY RANGECROFT

UNIVERSIDAD DE EXETER

El cambio climático está afectando a los glaciares de todo el mundo. La vulnerabilidad y sensibilidad de los glaciares de los Andes bolivianos hace que éstos puedan considerarse un “ecosistema de alerta” para las regiones montañosas de otras zonas. Los glaciares de roca están protegidos por formaciones rocosas y pueden desempeñar un papel fundamental en el almacenamiento de agua a largo plazo, y por lo tanto deben formar parte de las estrategias de gestión de los recursos hídricos y de adaptación al cambio climático. El presente informe explica la investigación realizada para crear el primer inventario de glaciares de roca de Bolivia, y subraya la necesidad de dar prioridad a la conservación de las zonas donde se encuentran estos glaciares, con el objetivo de proteger los recursos hídricos de las poblaciones vulnerables.

Los **informes de investigación de Oxfam** son redactados para compartir los resultados de las investigaciones, contribuir al debate público e invitar a aportar ideas sobre políticas y prácticas humanitarias y de desarrollo. No reflejan necesariamente la postura política de Oxfam. Los puntos de vista expresados son los del autor y no necesariamente los de Oxfam.

ÍNDICE

ÍNDICE.....	2
Resumen ejecutivo.....	3
1 Introducción	4
2 Glaciares de roca.....	6
3 Inventario de los glaciares de roca.....	8
4 La importancia de los glaciares de roca como reservas de agua	9
5 El impacto del cambio climático en los glaciares de roca	12
6 Resumen y observaciones finales.....	13
Bibliografía.....	14
La autora.....	17

RESUMEN EJECUTIVO

Se prevé que la seguridad de los recursos hídricos de los Andes bolivianos se reduzca en el futuro, debido tanto al esperado incremento de la demanda de agua como a la reducción de su suministro, lo cual repercutirá negativamente en la disponibilidad de agua y por lo tanto en la seguridad alimentaria, la generación de energía eléctrica y los medios de vida. El retroceso de los glaciares en los Andes, uno de los factores que afectan al suministro de agua, tiene que ver con el incremento de las temperaturas provocado por el cambio climático. Por lo tanto, es importante recoger información sobre otros recursos hídricos en zonas de alta montaña tanto en los Andes bolivianos como en otras zonas áridas de alta montaña que se enfrenten a problemas similares.

Los glaciares de roca son masas de hielo cubiertas por una gruesa capa de roca. El hielo que contienen las convierte en un recurso hídrico potencialmente importante, especialmente en zonas áridas. Sin embargo, no hay mucha información sobre su distribución espacial o su tipología. Son más pequeños que los glaciares de hielo estándar, se dan a una altitud menor y son menos visibles.

Con el objetivo de mejorar los conocimientos necesarios para la futura gestión de los recursos hídricos en Bolivia, esta investigación, realizada con la colaboración de Oxfam y Agua Sustentable, ha creado el primer inventario de glaciares de roca del país (15–22°S), informando sobre la cantidad, el tamaño y la distribución de estos glaciares de roca. En total, se descubrieron 94 glaciares de roca en los Andes bolivianos, de los cuales se cree que 54 contienen hielo y por lo tanto constituyen un recurso hídrico activo. También fue posible hacer una estimación de su importancia como reservas de agua para las comunidades locales en comparación con los glaciares estándar.

Los efectos del cambio climático sobre los glaciares y otros recursos hídricos están avanzando rápidamente en los Andes bolivianos; por esta razón, Bolivia puede servir de “indicador de alerta temprana” de los problemas que puedan surgir en las zonas áridas de todo el mundo. Gracias a su cubierta rocosa, los glaciares de roca están en cierta medida aislados y, a medida que se incrementen las temperaturas, resistirán mejor el deshielo que los glaciares de hielo. La presente investigación, que pone de relieve la presencia de glaciares de roca y establece métodos para identificarlos, trata de mejorar los conocimientos sobre los recursos hídricos de los Andes bolivianos, así como de contribuir a estudios similares en otros lugares. También subraya la necesidad de dar prioridad a la conservación de las zonas donde se encuentran los glaciares de roca, de cara a proteger los recursos hídricos de las poblaciones vulnerables.

Para ver el inventario de glaciares de roca resultado de esta investigación, puede consultar la página de Agua Sustentable, <http://www.aguasustentable.org>

1 INTRODUCCIÓN

El incremento de la demanda de agua está vinculado al continuo crecimiento demográfico, entre otros factores; al mismo tiempo el cambio climático está acelerando el deshielo de los glaciares, lo cual plantea graves problemas de gestión de los recursos hídricos en zonas áridas y montañosas. (Bradley et al., 2006; Painter, 2007; Jeschke, 2009). Para muchos países, garantizar un adecuado suministro de agua constituye uno de los mayores retos del siglo XXI.

Bolivia es uno de los países más vulnerables frente a los efectos del cambio climático debido a sus elevados niveles de pobreza y desigualdad, y sin embargo su capacidad de adaptación es muy reducida. Los grupos sociales vulnerables serán los más afectados por el cambio climático, ya que están menos preparados para hacer frente a sus efectos (Oxfam, 2009).

Los recursos hídricos de Bolivia, un país sin salida al mar, no se distribuyen de forma uniforme: las tierras bajas en el Este del país tienen un clima húmedo y tropical, mientras que el Oeste del país está ocupado por el Altiplano, de clima seco, y las montañas de los Andes. El Altiplano recibe muy pocas precipitaciones, con una larga estación seca que se prolonga de mayo a octubre. La Paz, capital de Bolivia (imagen 1) se encuentra a unos 4.000 metros por encima del nivel del mar, en el Altiplano, y sus recursos hídricos son limitados; sus principales recursos hídricos son las precipitaciones y los glaciares. Los “glaciares de hielo” estándar son especialmente importantes durante la estación seca por el agua que generan durante el deshielo. Los glaciares constituyen una de las principales fuentes de agua para el consumo, la agricultura y la generación de energía eléctrica (Jordan, 2008; Vuille et al., 2008; Chevallier et al., 2011). Se estima que los glaciares de la Cordillera Real proveen entre el 12% y el 40% del agua potable de La Paz (Vergara, 2009; Soruco, 2012).

Los glaciares, los glaciares cubiertos por detrito, y los glaciares de roca son los tres elementos principales que caracterizan la criósfera (la parte helada de la superficie terrestre) andina (Bodin et al., 2010). Sin embargo, se ha producido un retroceso de los glaciares en todo el mundo, lo cual afecta a los recursos hídricos en las zonas bajas (IPCC, 2014). En los últimos sesenta años, los glaciares bolivianos han perdido aproximadamente la mitad de su volumen (Soruco et al., 2009), lo cual ha dado lugar a la desaparición de muchos glaciares de pequeño tamaño, como por ejemplo el famoso glaciar de Chacaltaya, próximo a La Paz (imagen 2), que desapareció en 2009, seis años antes de lo previsto. Se prevé que la seguridad de los recursos hídricos se convierta en un grave problema para La Paz, debido a las tensiones creadas por el aumento de la población, el retroceso de los glaciares y los cambios en los regímenes de temperatura y precipitaciones, cuyos impactos ya se reflejan en el retroceso de los glaciares, las inundaciones y los cambios en las estaciones y los patrones meteorológicos. La menor seguridad de los recursos hídricos repercutirá negativamente en los medios de vida de, posiblemente, millones de personas.

Ante el retroceso de los glaciares en todo el mundo, así como los cambios y el incremento de la demanda de agua, es necesario hacer una investigación sobre las reservas de agua en zonas altas de muchas regiones del mundo (Brenning et al., 2007). Oxfam, la Universidad de Exeter, NERC (Natural Environment Research Council) y la ONG boliviana Agua Sustentable han financiado un proyecto doctoral de investigación para determinar la distribución, cantidad y tamaño de los glaciares de roca en Bolivia. La autora del presente informe, Sally Rangecroft, llevó a cabo la investigación durante cuatro años. Puede consultar el inventario de los glaciares de roca resultado de la investigación en la página de Agua Sustentable: <http://www.aguasustentable.org>



Imagen 1: Zona de viviendas densamente poblada en la parte alta de La Paz (16.5°S, 68.15°O) que se extiende en el altiplano de El Alto, a 4.000 metros de altura. Foto: S Rangecroft, julio de 2012.



Imagen 2: Antigua estación de esquí en Chacaltaya, cerca de La Paz. Foto: S Rangecroft, julio de 2011.

2 GLACIARES DE ROCA

Los glaciares de roca (imagen 3) son formaciones de hielo y roca que suelen darse en zonas de alta montaña (Berthling, 2011). Están formados por una parte central compuesta de hielo o de roca helada, cubierta de una gruesa capa de residuos de roca (de aproximadamente cinco metros de espesor). Se calcula que los glaciares de roca tienen entre un 40% y un 60% de hielo bajo su capa rocosa, que funciona como aislante del hielo ante los cambios de temperatura (Brenning, 2005a; Estrada, 2009). Tienen una parte frontal inclinada (hocico) y laderas inclinadas, y su longitud suele ser mayor que su anchura (Giardino & Vitek 1988; Summerfields 1991; Hamilton & Whalley, 1995; Benn & Evans, 1998; Evans, 2005; Jansen & Hergarten, 2006). Su rasgo más distintivo es la morfología de su superficie, que está formada por una serie de crestas y surcos (imagen 3).

Existen muchas maneras de clasificar los glaciares de roca, pero una de las más habituales es por su estado de actividad. Los glaciares de roca “activos” contienen hielo y todavía están en movimiento (normalmente entre milímetros y centímetros al año). Los glaciares de roca se mueven a una velocidad mucho menor que los glaciares de hielo, que normalmente se desplazan entre decenas y cientos de metros cada año. Los antiguos glaciares (“residuales”) ya no contienen hielo y por lo tanto tampoco están en movimiento.

Aunque los glaciares de roca contienen mucho menos hielo que los glaciares de hielo en las zonas áridas, en muchos lugares apenas hay glaciares de hielo, o son escasos. Por lo tanto, se considera que los glaciares de roca constituyen reservas fundamentales de agua congelada (Francou et al., 1999; Brenning, 2005a; Azócar & Brenning, 2010; Kellerer-Pirklbauer et al., 2012; Rangecroft et al., 2013). Sin embargo, su importancia como recurso hídrico en Bolivia no se había analizado con anterioridad a este proyecto doctoral de investigación.

Dicho proyecto ha establecido:

- El primer inventario de glaciares de roca de los Andes bolivianos;
- Las primeras estimaciones sobre la cantidad de agua que contienen los glaciares de roca;
- El incremento de temperatura previsto en los Andes bolivianos;
- Las posibles repercusiones del incremento de temperatura previsto para los glaciares de roca.



Imagen 3: Típicos glaciares de roca bolivianos, con su tamaño marcado. El primero se encuentra en Pico Austria, en la región de Tuni Condoriri; el segundo, en Huayna Potosí. Foto: S Rangecroft, julio de 2011 y agosto de 2012 respectivamente.

3 INVENTARIO DE LOS GLACIARES DE ROCA

Aunque los glaciares de roca están presentes en muchas de las principales zonas montañosas del mundo, la mayor parte de las investigaciones se han centrado en los Alpes europeos, si bien en los últimos tiempos se han llevado a cabo otras investigaciones en los Andes chilenos y argentinos. El primer paso a la hora de analizar la distribución espacial y la superficie que ocupan estas formaciones de hielo es la elaboración de un inventario de glaciares de roca, una información necesaria para la gestión de los recursos hídricos.

El inventario de glaciares de roca se elaboró combinando el trabajo de campo con el análisis visual de datos satelitales. Se identificó y llevó a cabo un estudio cartográfico de los glaciares de roca utilizando imágenes satelitales de alta resolución de Google Earth (imagen 4), imágenes satelitales de pago y fotografías aéreas. Entre los meses de julio y agosto de 2011 y 2012, se llevaron a cabo estudios de campo a fin de evaluar la fiabilidad del estudio cartográfico y de la clasificación de los glaciares de roca.

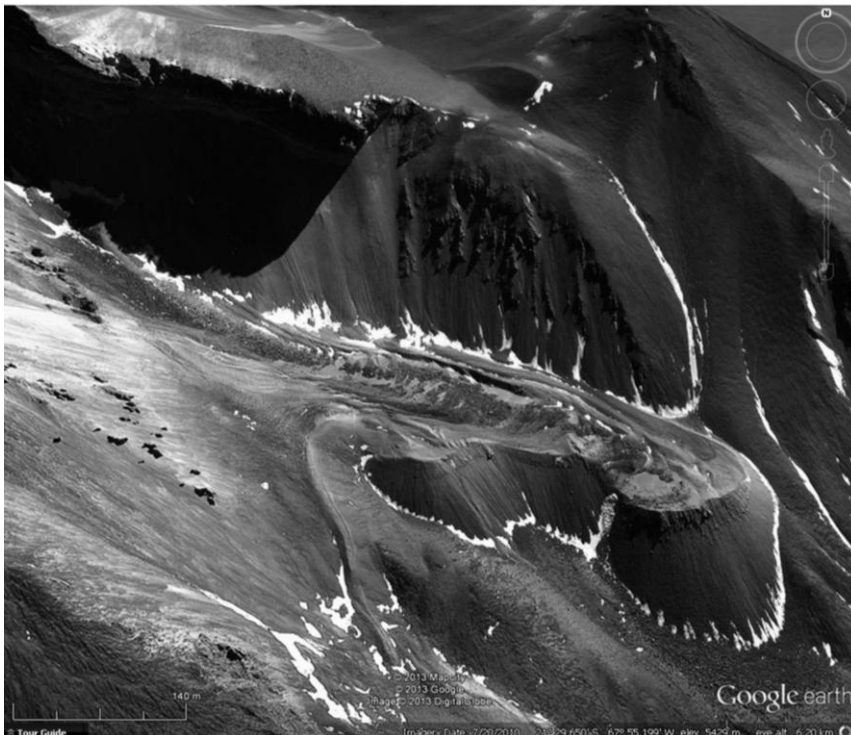


Imagen 4: Glaciar de roca en Bolivia, Caquilla (21.5 °S). Imagen: Google Earth

Se identificaron un total de 94 glaciares de roca en los Andes bolivianos, de los cuales 54 se clasificaron como activos (con hielo) (ver Imagen 4). Los cuarenta restantes (el 43%) se clasificaron como glaciares residuales (Rangecroft et al., 2014). Se estableció que la altitud media de los glaciares de roca activos es de 4.980 metros (medidos desde el fondo del glaciar de roca). La altitud media de los glaciares de roca residuales es aproximadamente 100 metros inferior: 4870 metros. Se sabe que la isoterma cero ha elevado el paisaje a causa del incremento de la temperatura, lo cual se refleja en los 100 metros de diferencia entre los actuales (activos) y los antiguos (residuales) glaciares de roca.

La investigación reveló que los glaciares de roca en Bolivia tienen una longitud media de 500 metros. Se ha calculado que la superficie media de los glaciares de roca es de $0,12\text{km}^2$, el equivalente a 17 campos de fútbol.

Los glaciares de roca son menos abundantes en Bolivia que en otras zonas de los Andes (Chile, Argentina), las Montañas Rocosas estadounidenses y los Alpes Europeos (Rangecroft et al., 2014).

La revista científica *Permafrost and Periglacial Processes* (Rangecroft et al., 2014) ha publicado más información sobre el inventario de glaciares de roca, y también puede consultarse en www.aguasustentable.org

4 LA IMPORTANCIA DE LOS GLACIARES DE ROCA COMO RESERVAS DE AGUA

Se sabe que los glaciares de roca constituyen una importante reserva de agua congelada, ya que funcionan como depósitos de agua cuando el nivel de precipitaciones es muy bajo (Francou et al., 1999; Trombotto et al., 1999). Es importante cuantificar la cantidad de agua que aportan al sistema hídrico de la zona, a fin de mejorar la gestión de los recursos hídricos. A pesar de su importancia, hasta ahora apenas se ha intentado calcular la cantidad de agua que contienen los glaciares de roca, especialmente en los Andes sudamericanos.

El contenido de hielo de los glaciares de roca varía considerablemente, aunque algunos especialistas indican que éste va del 40% al 60% en el caso de los glaciares activos (Barsch, 1996; Haeberli et al., 1998; Arenson et al., 2002; Hausmann et al., 2007; Brenning, 2008; Krainer & Ribis, 2012). Para poder hacer una estimación de la importancia de los glaciares de roca como reservas de agua y hielo, es necesario conocer su abundancia, para posteriormente calcular su contenido de hielo y después su equivalente en agua. Actualmente no hay datos de campo que permitan determinar cuál es el contenido de hielo de los glaciares de roca en Bolivia, ni tampoco el espesor del mismo, de modo que para este proyecto se han utilizado estimaciones.

Las estimaciones del contenido de hielo en los glaciares de roca se basan en la bibliografía; se han utilizado dos estimaciones del contenido de hielo, una a la baja (40%) y otra al alza (60%).

Para calcular el espesor de hielo de los glaciares de roca se utilizaron dos métodos. En ambos fue necesario disponer de datos sobre el tamaño del glaciar de roca (superficie). En el Método 1 se utilizó una ecuación creada por Brenning (2005b) durante su trabajo de campo en los Andes chilenos (Azócar & Brenning, 2010). En el Método 2 se aplicó un espesor mínimo constante del permafrost de los glaciares de roca de 20 metros para todos los lugares (Brenning, 2008).

Las estimaciones del contenido de hielo y de su consiguiente equivalente de agua se calcularon utilizando los datos sobre el tamaño de los glaciares de roca incluidos en el inventario de glaciares de roca (Rangecroft et al., 2014). Los resultados indican que los glaciares de roca de los Andes bolivianos contienen entre 50.000 millones y 140.000 millones de litros de agua, una cantidad equivalente a entre 20.000 y 56.000 piscinas olímpicas.

Para realizar el presente estudio, se han analizado tres sub-regiones: la Cordillera Real (15° - 17° S), Sajama (17–18°S) y la Cordillera Occidental (18°–22°S) (Imagen 5).

- En la Cordillera Real se encuentran dieciséis glaciares de roca activos, que ocupan una superficie de 1,07 km². Los glaciares de roca de la Cordillera Real contienen entre 7.000 millones y 17.600 millones de litros (L) de agua, una cantidad equivalente a entre 2.800 y 7.040 piscinas olímpicas. Estas cifras constituyen una media de 10.000 millones de litros, el equivalente a 4.000 piscinas.
- En la región de Sajama, se identificaron quince glaciares de roca activos, que ocupan una superficie de 2,98 km². Estos glaciares de roca contienen entre 21.000 millones y 65.000 millones de litros de agua, una cantidad equivalente a entre 8.400 y 26.000 piscinas. La media para esta zona es de 50.000 millones de litros de agua, o 20.000 piscinas.
- En la región de la Cordillera Occidental se descubrieron veintitrés glaciares de roca activos, que ocupan una superficie de 2,88 km². Se calcula que dichos glaciares contienen entre 21.000 millones y 54.000 millones de litros de agua, una cantidad equivalente a entre 8.400 y 21.600 piscinas, lo cual nos da una media de 40.000 millones de litros de agua, o 16.000 piscinas olímpicas.

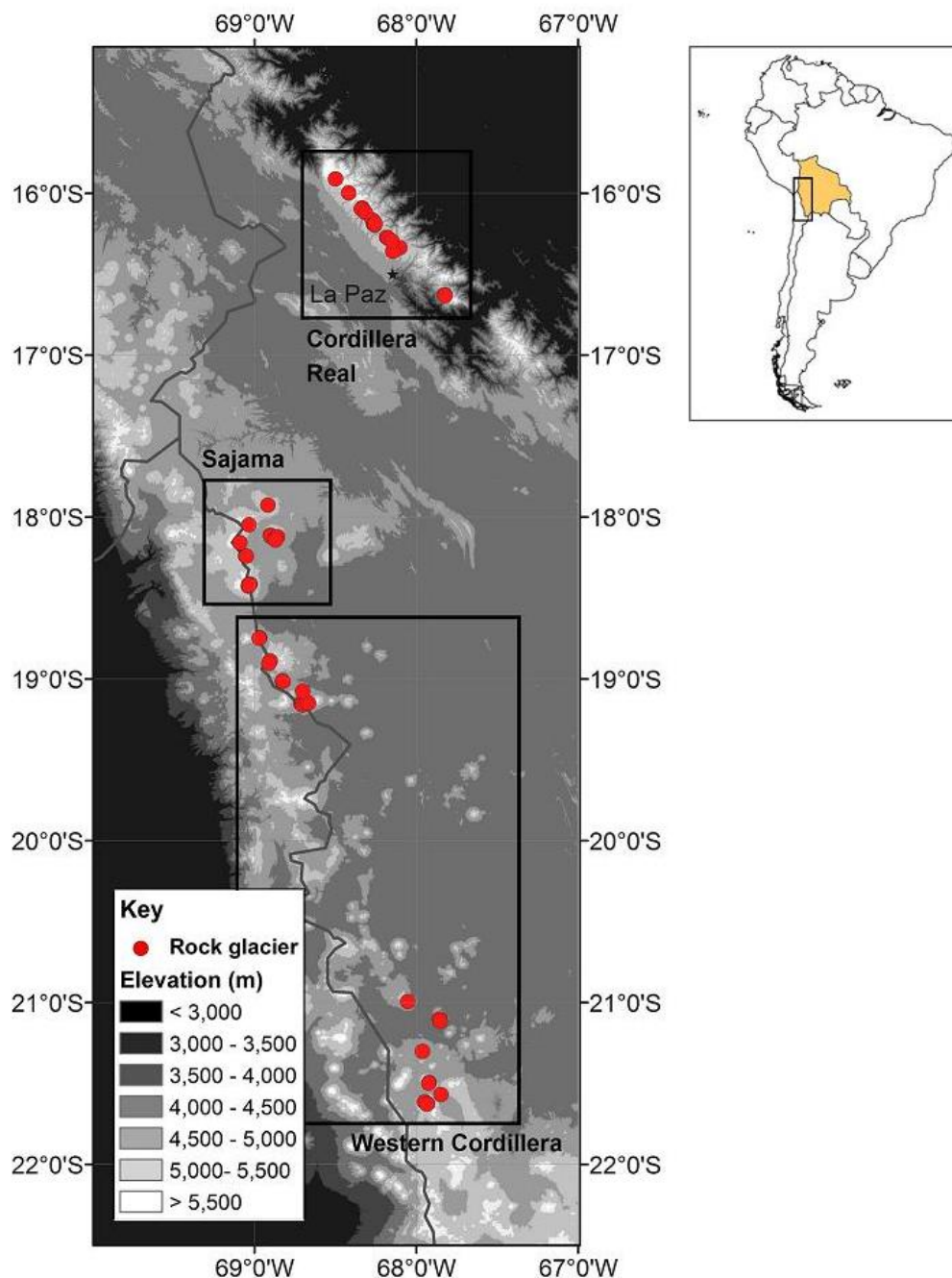


Imagen 5: Inventario de los glaciares de roca activos en Bolivia. Los puntos rojos indican la ubicación de los glaciares de roca en los Andes bolivianos. Cada uno de los puntos puede indicar la presencia de varios glaciares de roca. Imagen: Rangecroft et al. 2015

Con estos resultados, se llevó a cabo un análisis comparativo de la importancia de los glaciares de roca como recurso hídrico frente a la de los glaciares de hielo (Rangecroft et al., 2015). Aunque apenas existen datos sobre la actual superficie de glaciares de hielo en los Andes bolivianos, el cálculo más reciente para la Cordillera Real sitúa esta superficie en 185,5 km² (Ramirez et al., 2012). También hay glaciares en Sajama, pero no hay datos recientes sobre esta región, lo cual pone de manifiesto el importante déficit de datos sobre los Andes bolivianos, ya que no existen estimaciones actuales del alcance de los glaciares de hielo en el conjunto de la región. Las investigaciones recientes se han centrado únicamente en la Cordillera Real (Sorcou et al., 2009; Ramirez et al., 2012; Lui et al., 2013).

En general, se ha calculado que en el conjunto de los Andes bolivianos el ratio entre glaciares de roca y glaciares de hielo para la equivalencia de agua es de aproximadamente 1:40. Asimismo, se ha concluido que en la Cordillera Real predominan los glaciares, con un ratio glaciares de roca – glaciares de hielo de 1: 264. La equivalencia de agua entre glaciares de roca y glaciares de hielo era de aproximadamente 1:9 en la región de Sajama. En la Cordillera Occidental, dada la ausencia de glaciares y las muy escasas precipitaciones, cabe suponer que los glaciares de roca constituyen un importante amortiguador hídrico para las comunidades locales de montaña que viven en las proximidades en esta región en concreto.

Con los datos del inventario, se ha calculado que la superficie de glaciares de roca activos en los Andes bolivianos es de 6,92 km², cifra que se corresponde con un contenido de agua mínimo estimado de 50 millones de litros. Utilizando como referencia un consumo medio de agua de 50 litros por persona y día establecido por la Organización Mundial de la Salud (Howard & Bartram, 2003, p.1), el estudio calcula que los glaciares de roca en Bolivia contienen una cantidad de agua equivalente al consumo de 2.739.726 de personas en un año. Sin embargo, cabe señalar que el agua de los glaciares de roca no está disponible de forma inmediata, sino que se va liberando lentamente con el paso del tiempo.

Es importante tener en cuenta que los glaciares de roca no se distribuyen de forma uniforme en los Andes bolivianos. Teniendo en cuenta que no hay glaciares de hielo en la Cordillera Occidental, este inventario de glaciares de roca ha puesto de manifiesto que los glaciares de roca, y el mínimo de 21.000 millones de litros de agua que contienen según las estimaciones, pueden considerarse un recurso hídrico local especialmente importante para las comunidades de montaña en la zona Sur de los Andes bolivianos (18°–22°S). Del mismo modo, cabe suponer que en Sajama, donde el hielo es también escaso, el agua que contienen los glaciares de roca (como mínimo, 21.000 millones de litros) también podría constituir un recurso importante para las comunidades locales que viven en las montañas y en el Parque Nacional de Sajama. En la Cordillera Real predominan los glaciares de hielo, que ocupan una superficie aproximada de 185,5 km² (Ramirez et al., 2012), mientras que los glaciares de roca son más pequeños y menos abundantes. Se calcula que, en esta región, los glaciares de roca ocupan una superficie de 1,07 km², y por lo tanto consideramos que éstos no constituyen un recurso hídrico importante para la región de La Paz (en comparación con los glaciares de hielo).

El contenido de agua de los glaciares de roca en Bolivia es bastante inferior al de los glaciares de roca de los Andes chilenos (Azócar & Brenning, 2010) y los Andes argentinos (Perucca & Esper Angillieri, 2011); en ambos países, los glaciares de roca son mucho más abundantes. Sin embargo, como ya se ha señalado, es probable que los glaciares de roca se conviertan en un recurso hídrico fundamental para las comunidades de montaña en algunas zonas de Bolivia.

Para obtener más información sobre el contenido de agua estimado de los glaciares de roca en Bolivia, puede consultar Rangelcroft et al. (2015), en *Arctic, Antarctic and Alpine Research*.

5 EL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS GLACIARES DE ROCA

Utilizando los datos climáticos actuales (<http://www.worldclim.org/>) y los proyectados (www.ccafs-climate.org/data/), hemos proyectado el futuro incremento de las temperaturas previsto para los Andes bolivianos en el marco del escenario de emisiones A1B del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC SRES, 2000). El escenario de emisiones A1B es un escenario medio, utilizado en la reducción de la escala de datos por tratarse de una media.

Utilizando estos datos, se proyectó la actual y futura extensión del permafrost en los Andes bolivianos, utilizando la media anual de temperatura del aire de 0°C como referencia para el límite del permafrost. Este proyecto ha concluido que:

- Los cambios de temperatura previstos en los Andes bolivianos oscilan entre 2,7 °C y 3,2 °C en 2050 y entre 4,2 °C y 4,9 °C en 2080 (imagen 6);
- Los resultados indican que este calentamiento provocará una reducción de la actual extensión del permafrost del 95% en 2050 y del 99% en 2080 (imagen 7);
- La media anual de temperatura del aire en los glaciares de roca activos muestra que los glaciares de roca se concentran en torno a la isoterma cero (0 °C), y se sabe que esto ha tendido a ascender con el tiempo por el incremento de las temperaturas.

Los incrementos de temperatura previstos en Bolivia para finales del siglo XXI oscilan entre 3,5 °C y 5,9 °C (Mitchell & Hume, 2000). Las previsiones estimadas por la presente investigación para los Andes bolivianos se sitúan en la parte superior de ese rango.

Las investigaciones para calcular la respuesta del permafrost al cambio climático se han limitado casi exclusivamente al hemisferio norte. Es “prácticamente seguro” que en el hemisferio norte el permafrost seguirá reduciéndose a lo largo del siglo XXI (IPCC, 2014). Actualmente no existen análisis similares del permafrost del hemisferio sur, y sin embargo dichos análisis son necesarios para orientar la toma de decisiones sobre futuras estrategias de abastecimiento de agua y adaptación al cambio climático. Además, apenas existen publicaciones que analicen los efectos del cambio climático en el permafrost de las zonas montañosas (Bonnaventure & Lewkowicz, 2011).

Con el objetivo de comprender los efectos del incremento de temperaturas previsto sobre los glaciares de roca activos actualmente:

- Calculamos que, en 2050, el 34% de los glaciares de roca activos en Bolivia mantendrán temperaturas que permitirán su estado de actividad (<+2 °C);
- Se prevé que, en 2080, sólo un glaciar de roca se mantendrá dentro de este umbral de temperatura media del aire.

Sin embargo, no conviene olvidar que la respuesta de los glaciares de roca ante el cambio climático es lenta (en una escala medida en décadas), y que por lo tanto las respuestas proyectadas por el presente estudio irán por detrás de los cambios en el clima. No obstante, el principal mensaje que transmiten estos resultados sigue siendo que, si bien el permafrost de los glaciares de roca es más resistente frente al aumento de las temperaturas, no está en absoluto libre de las consecuencias de un incremento continuado de las mismas.

6 RESUMEN Y OBSERVACIONES FINALES

Los glaciares de roca, al igual que los de hielo, son un componente esencial del régimen hídrico de las cuencas hídricas. Los glaciares constituyen importantes reservas hídricas, especialmente durante las estaciones secas, y por lo tanto contribuyen a los ciclos de las aguas superficiales y subterráneas de los que dependen los medios de vida y el desarrollo de muchas comunidades de zonas montañosas. Los glaciares pueden constituir la fuente, o una de las fuentes, de muchos ríos, y su conservación es esencial para el buen funcionamiento de los ecosistemas de agua dulce, así como para mantener la seguridad alimentaria de las cuencas inferiores de los ríos.

El cambio climático está afectando a los glaciares de todo el mundo, y los glaciares de roca no son inmunes a él. La vulnerabilidad y sensibilidad de los glaciares de los Andes bolivianos hacen que éstos puedan considerarse un “ecosistema de alerta” para todas regiones montañosas del mundo.

El cambio climático no es un problema que afecte sólo a un país en concreto, sino un reto global que requiere soluciones globales (Longden et al., 2012). No sólo deben adoptarse medidas a nivel mundial para reducir drásticamente las emisiones de dióxido de carbono y de otros gases de efecto invernadero, sino también medidas en el ámbito nacional en países vulnerables como Bolivia. El cambio climático provocará cambios en los regímenes hídricos y, en muchos casos, reducirá la seguridad de los recursos hídricos de las comunidades; por lo tanto, deben adoptarse y aplicarse medidas de adaptación.

Al estar protegidos por formaciones rocosas, la respuesta de los glaciares de roca a los cambios climáticos es relativamente lenta. De este modo, en determinadas circunstancias pueden desempeñar un papel fundamental en el almacenamiento de agua a largo plazo, y por lo tanto deberían ser un elemento más importante en las estrategias de gestión del agua y de adaptación al cambio climático de lo que han sido hasta la fecha.

En lo que respecta a las políticas, el inventario de glaciares de roca resultado de la presente investigación permitirá a los responsables políticos dar prioridad a la preservación de las zonas donde se sitúan estos glaciares. El conocimiento de la cantidad de agua que almacenan actualmente los glaciares de roca también es un elemento importante para mejorar la gestión de los recursos hídricos, así como para la aplicación de políticas dirigidas a proteger dichos recursos.

En el contexto boliviano, también cabe señalar que la minería supone una amenaza adicional para los glaciares de roca (Campanini, 2014); al situarse en su mayoría en las partes más bajas de las cadenas montañosas, son más sensibles a los daños causados por las actividades mineras que los glaciares de hielo. Este inventario debe utilizarse para que la ubicación de los glaciares de roca se tenga en cuenta a la hora de determinar en qué lugares podrían desarrollarse actividades mineras. Se considera que esta manera de proteger los glaciares de roca ha tenido éxito en Chile y Argentina. En Argentina se ha aprobado legislación específica para proteger los glaciares y las zonas colindantes (legislación argentina, Ley 26.639, 2010). En Bolivia debe promoverse la aprobación de leyes similares a fin de garantizar la protección de los glaciares, además de la conservación y restauración de los humedales y de otros ecosistemas esenciales para el almacenamiento y el abastecimiento de agua, con el objetivo último de garantizar la realización del derecho humano al agua.

BIBLIOGRAFÍA

- Arenson, L., Hoelzle, M. and Springman, S. 2002. Borehole Deformation Measurements and Internal Structure of Some Rock Glaciers in Switzerland. *Permafrost and Periglacial Processes*, 13: 117–135.
- Azócar, G. F. and A. Brenning. 2010. Hydrological and geomorphological significance of rock glaciers in the dry Andes, Chile (27° - 33°S). *Permafrost and Periglacial Processes*, 21: 42–53.
- Barsch, D. 1996. *Rockglaciers – indicator for the present and former Geoecology in high mountain environments*. Springer, Berlin.
- Benn, D. and Evans, D. J. A. 1998. *Glaciers & Glaciation*. Hodder Arnold Publication, London.
- Berthling, I. 2011. Beyond confusion: Rock glaciers are cryo-conditioned landforms. *Geomorphology*, 131: 98–106.
- Bodin, X., Rojas, F. and Brenning, A. 2010. Status and evolution of the cryosphere in the Andes of Santiago (Chile, 33.5°S). *Geomorphology* 118: 453–64.
- Bonnaventure, P. P. and Lewkowitz, A. G. 2011. Modelling climate change effects on the spatial distribution of mountain permafrost at three sites in northwest Canada. *Climatic Change*, 105: 293–312.
- Bradley, R. S., Vuille, M., Diaz, H. F., Vergara, W. 2006. Threats to water supplies in the tropical Andes. *Science*, 312: 1755–56.
- Brenning, A. 2005a. Geomorphological, hydrological and climatic significance of rock glaciers in the Andes of Central Chile (33-35°S). *Permafrost and Periglacial Processes*, 16: 231–40.
- Brenning, A. 2005b. Climatic and geomorphological controls of rock glaciers in the Andes of Central Chile: Combining statistical modelling and field mapping. Tesis doctoral. Humboldt-Universität zu Berlin.
- Brenning, A. 2008. The impact of mining on rock glaciers and glaciers: examples from central Chile. In Orlove, B. S., Wiegandt, E. and Luckman, B. (eds) *Darkening peaks: glacier retreat, science, and society*. University of California Press, Berkeley, Chapter 14: 196–205.
- Brenning, A, Grasser, M. and Friend, D. A. 2007. Statistical estimation and generalized additive modeling of rock glacier distribution in the San Juan Mountains, Colorado, United States. *Journal of Geophysical Research* 112(F2), DOI: 10.1029/2006JF000528
- Campanini, O. 2014. Impactos de la política minera sobre los recursos hídricos y el medio ambiente. Cedib, Petropress, <http://www.cedib.org/wp-content/uploads/2014/10/impactos-politica-minera.pdf>.
- Chevallier, P., Pouyaud, B., Suarez, W., Condom, T. 2011. Climate change threats to environment in the tropical Andes: glaciers and water resources. *Regional Environmental Change*, 11(1): 179–87.
- Estrada, D. 2009. Scientist Warns of Threats to Rock Glaciers. Consultado por última vez: 09/05/11, <http://ipsnews.net/news.asp?idnews=46619>
- Evans, D. J. A. 2005. *Glacial Landscapes*. London: Hodder Education.
- Francou, B., Fabre, D., Pouyaud, B., Jomelli, V. and Arnaud, Y. 1999. Symptoms of degradation in a tropical rock glacier, Bolivian Andes. *Permafrost and Periglacial Processes*, 10: 91–100.
- Giardino, J. R. and Vitek, J. D. 1988. The significance of rock glaciers in the glacial-periglacial landscape continuum. *Journal of Quaternary Science*, 3(1): 97–103.

Haeberli, W., Hoelzle, M., Kääh, A., Keller, F., Vonder Mühll, D. and Wagner, S. 1998. Ten years after drilling through the permafrost of the active rock glacier Murtèl, eastern Swiss Alps: Answered questions and new perspectives. *Proceedings of the 7th International Conference on Permafrost, Yellowknife*: 403–10.

Hamilton, S. J. and Whalley, B. W. 1995. Rock glacier nomenclature: A re-assessment. *Geomorphology*, 14: 73–80.

Hausmann, H., Krainer, K., Brückl, E., Mostler, W. 2007. Internal structure and ice content of Reichenkar rock glacier (Stubai Alps, Austria) assessed by geophysical investigations. *Permafrost and Periglacial Processes*, 18 (4): 351–67.

Howard, G. and Bartram, J. 2003. Domestic Water Quality, Service Level and Health. World Health Organization. http://www.who.int/water_sanitation_health/diseases/WSH03.02.pdf

IPCC SRES. 2000. Special Report on Emissions Scenarios: Summary for Policymakers, Working Group III. Nakićenović, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A., Yong Jung, T., Kram, T., Lebre La Rovere, E., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Riahi, K., Roehrl, A., Rogner, H. H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., Swart, R., van Rooijen, S., Victor, N., Dadi, Z. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC. 2014. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (eds) Field, C. B., Barros, V. R., Dokken, D. J., Mach, K. J., Mastrandrea, M. D., Bilir, T. E., Chatterjee, M., Ebi, K. L., Estrada, Y. O., Genova, R. C., Girma, B., Kissel, E. S., Levy, A. N., MacCracken, S., Mastrandrea, P. R., White, L. L. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA.

Jansen, F. and Hergarten, S. 2006. Rock glacier dynamics: Stick-slip motion coupled to hydrology. *Geophysical Research Letters*, 33(10).

Jeschke, M. L. 2009. Glacier recession in the Bolivian Andes as a consequence of global climate change: Impacts on regional water supply according to the simulation of future runoff from Zongo glacier. Disertación, Universität Potsdam.

Jordan, E. 2008. Glaciers of South America: Glaciers of Bolivia. Satellite Image Atlas of Glaciers of the World. United States Geological Survey 18 March 2008, <http://pubs.usgs.gov/pp/p1386i/bolivia/intro.html>

Kellerer-Pirklbauer A., Lieb, G. K. and Kleinfurchner, H. 2012. A new rock glacier inventory of the Eastern European Alps. *Austrian journal of Earth Sciences*, 105(2): 78–93.

Krainer, K. and Ribis, M. 2012. A rock glacier inventory of the Tyrolean Alps (Austria). *Austrian Journal of Earth Sciences*, 105(2): 32–47.

Ley 26.639, 2010. Régimen de Presupuestos Mínimos para la Preservación de los Glaciares y del Ambiente Periglacial. El Senado y Cámara de Diputados de la Nación Argentina.

Longden, K., Rabari, R., Hassan, M. and Majumder-Russel, D., 2012. Climate change: Mitigation and adaptation. A4ID, Advocates for International Development, Lawyers Eradicating Poverty. <http://a4id.org/sites/default/files/files/%5BA4ID%5D%20Climate%20change%20Mitigation%20and%20Adaptation.pdf>

Lui, T., Kinouchi, T. and Ledezma, F. 2013 Characterization of recent glacier decline in the Cordillera Real by LANDSAT, ALOS and ASTER data. *Remote Sensing of Environment*. 137: 158–72.

Mitchell, T. D. and Hume, M. 2000. A country-by-country analysis of past and future warming rates. Tyndall Centre Working Paper, UEA, Norwich, Reino Unido.

Oxfam. 2009. Bolivia: Cambio climático, pobreza y adaptación. Resumen ejecutivo. Oxfam Internacional, <http://www.oxfam.org/sites/www.oxfam.org/files/bolivia-climate-change-adaptation-summary-0911.pdf>

Painter, J. 2007. Desglaciación en la región andina, Informe sobre el Desarrollo Humano 2007/2008: La lucha contra el cambio climático: solidaridad en un mundo dividido. Oficina del Informe sobre el Desarrollo Humano, INFORME ESPECIAL.

Perucca, L. and Esper Angillieri, M. Y. 2011. Glaciers and rock glaciers' distribution at 28° SL, Dry Andes of Argentina, and some considerations about their hydrological significance. *Environmental Earth Sciences*, 64(8): 2079– 89.

Ramirez, E., Ribeiro, R., Machaca, A., Fuertes, R. and Simões, J. 2012. Glacier Inventory of the Cordillera Real – Bolivia using high resolution satellite images ALOS and CBERS-2B. *Geophysical Research Abstracts, EGU General Assembly 2012*, vol 14.

Rangecroft, S., Harrison, S., Anderson, K., Magrath, J., Castel, A. P., Pacheco, P. 2013. Climate change and water resources in arid mountains: an example from the Bolivian Andes. *AMBIO*. 42: 852–63.

Rangecroft, S., Harrison, S., Anderson, K., Magrath, J., Castel, A. P. and Pacheco, P. 2014. A first rock glacier inventory for the Bolivian Andes. *Permafrost and Periglacial Processes*. DOI:10.1002/ppp.1816

Rangecroft, S., Harrison, S. and Anderson, K. 2015. Rock glaciers as water stores in the Bolivian Andes: an assessment of their hydrological importance. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*. 47(1): 89–98.

Rangecroft et al., in review. Future climate warming and changes to mountain permafrost in the Bolivian Andes, *Climatic Change*.

Soruco, A. S. 2012. Medio siglo de fluctuaciones glaciares en la Cordillera Real y sus efectos hidrológicos en la ciudad de La Paz. IRD. ISBN 978-99954-62-0 [Spanish]

Soruco, A., Vincent, C., Francou, B. and Gonzalez, J. F. 2009. Glacier decline between 1963 and 2006 in the Cordillera Real, Bolivia. *Geophysical Research Letters*, 36(6).

Summerfields, M. A. 1991. *Global geomorphology*. Pearson Education Limited, Essex.

Trombotto, D., Buk, E. and Hernández, J. 1999. Rock glaciers in the Southern Central Andes (approx. 33°–34°S), Cordillera Frontal, Mendoza, Argentina. Bamberger. *Geographische Schriften* 19: 145–73.

Vergara, W. 2009. Assessing the potential consequences of climate destabilization in Latin America. Latin America and Caribbean region sustainable development working paper 32. The World Bank, Latin America and the Caribbean Region Sustainable Development Department.

Vuille, M., Francou, B., Wagnon, P., Juen, I., Kaser, G., Mark, B. G. and Bradley, R. S. 2008. Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. *Earth-Science Reviews*, 89: 79–96.

LA AUTORA



La Doctora Sally Rangelcroft ha realizado una investigación sobre los glaciares de roca, la seguridad de los recursos hídricos y el cambio climático en los Andes bolivianos como parte de sus estudios de Doctorado en la Universidad de Exeter. En la foto está sobre un glaciar de roca cerca de Chacaltaya, en la Cordillera Real, cerca de La Paz, donde los glaciares de hielo constituyen un importante recurso hídrico. Sin embargo, la región ha sufrido un rápido retroceso de los glaciares, que según las previsiones continuará a medida que se incrementen las temperaturas.

Informes de investigación de Oxfam

Este documento ha sido escrito por Sally Rangecroft. Oxfam agradece la colaboración de John Magrath, de Oxfam GB, del personal de Agua Sustentable en Bolivia, y de Oxfam en Bolivia en su elaboración. Forma parte de una serie de documentos dirigidos a contribuir al debate público sobre políticas humanitarias y de desarrollo.

Los informes de investigación de Oxfam se crean para compartir resultados de investigaciones, contribuir al debate público e invitar a aportar ideas sobre políticas humanitarias y de desarrollo. No reflejan necesariamente la postura política de Oxfam. Los puntos de vista expresados son los de los autores y no necesariamente los de Oxfam.

Agua Sustentable tiene el inventario de glaciares de roca, que puede consultarse en www.aguasustentable.org. Para obtener más información sobre las cuestiones planteadas por el presente informe puede ponerse en contacto con Agua Sustentable.

© Oxfam Internacional, abril de 2015

Esta publicación está sujeta a *copyright*, pero el texto puede ser utilizado libremente para la incidencia política y campañas, así como en el ámbito de la educación y de la investigación, siempre y cuando se indique la fuente de forma completa. El titular del *copyright* solicita que cualquier uso de su obra le sea comunicado con el objeto de evaluar su impacto. La reproducción del texto en otras circunstancias, o su uso en otras publicaciones, así como en traducciones y adaptaciones, podrá hacerse después de haber obtenido permiso y puede requerir el pago de una tasa. Debe ponerse en contacto con policyandpractice@oxfam.org.uk.

La información en esta publicación es correcta en el momento de enviarse a imprenta.

Publicado por Oxfam GB for Oxfam Internacional con ISBN 978-1-78077-862-4 en abril de 2015.
Oxfam GB, Oxfam House, John Smith Drive, Cowley, Oxford, OX4 2JY, UK.

OXFAM

Oxfam es una confederación internacional de 17 organizaciones que trabajan juntas en más de 90 países, como parte de un movimiento global a favor del cambio, para construir un futuro libre de la injusticia que supone la pobreza.

Para más información, puede escribir a cualquiera de las organizaciones o visitar la página www.oxfam.org

