



# PROYECTO GLACIARES+

Más allá de los riesgos hacia  
las oportunidades

## MODELAMIENTO DE LAGUNAS FUTURAS EN LECHOS GLACIARES: PRIMERAS EXPERIENCIAS EN EL PERÚ<sup>1</sup>

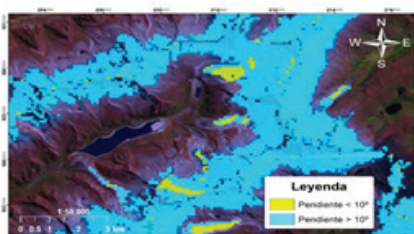
El cambio climático ha causado una dramática reducción en la extensión y volumen de los glaciares. En el Perú, el segundo Inventario Nacional de Glaciares exhibe la disminución del área glaciara en un 42.64% con respecto a un total de 2041.85 km<sup>2</sup>, documentado en el primer inventario de 1970 (ANA, 2012). El retroceso glaciara puede conllevar a la formación de nuevas lagunas en expuestas depresiones de lechos glaciares. Tales lagunas pueden incrementar las amenazas naturales para la población aguas abajo, pero también pueden constituir atractivos turísticos y nuevas opciones para la gestión del agua a nivel local, regional o de cuenca (Haerberli et al., 2016a; Haerberli et al., 2017; Salzmann et al., 2004). Como nuevos y mayores reservorios de agua dulce, estas lagunas abastecerían p. ej. poblaciones, hidroenergía y agricultura. En este sentido, la identificación de sitios de una posible formación de futuras lagunas es un paso esencial hacia la planificación temprana de medidas de gestión del riesgo de desastre, adaptación al cambio climático y gestión (integrada) de recursos hídricos (Haerberli et al., 2016a). Esta planificación debe entonces considerar desde ahora la formación de nuevos paisajes de alta montaña con ecosistemas cambiantes a largo plazo.

Un trabajo pionero de compilación y delimitación de posibles futuras lagunas en el Perú ha sido iniciado por la Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos (UGRH)<sup>2</sup> de la Autoridad Nacional del Agua (ANA), y continuado por el Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM)<sup>3</sup>. Este proceso ha sido acompañado y asistido por el equipo del Proyecto Glaciares+, iniciativa del Programa Global de Cambio Climático de la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE).

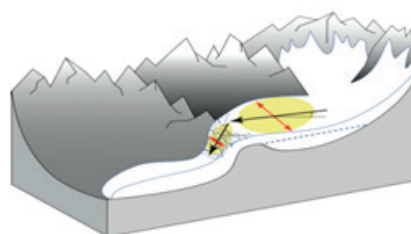
### DELIMITACIÓN DE NUEVAS LAGUNAS: METODOLOGÍA

La presente metodología muestra los procedimientos aplicados para una clasificación aproximada sobre el periodo de tiempo más probable en el que podrían formarse posibles futuras lagunas glaciares. Un modelo digital de terreno (DEM, por sus siglas en inglés) del año 2000 (SRTM) con resolución espacial de 90 m fue utilizado en combinación con límites

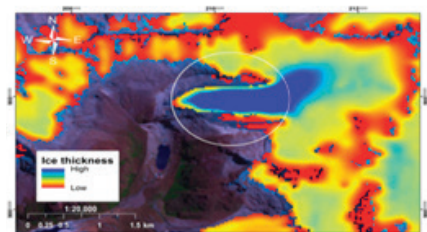
glaciares identificados en el segundo Inventario Nacional de Glaciares de la ANA (ANA, 2012). Estimaciones concernientes a posibles lagunas futuras con áreas mayores a 1 ha (superando los límites de la resolución SRTM) fueron realizadas en tres pasos mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), tal como se muestra en la figura 1 (Frey et al., 2010).



PASO I. Clasificación de la pendiente



PASO II. Criterios morfológicos del glaciar



PASO III. Modelamiento numérico

Figura 1. Pasos y criterios considerados en la delimitación de futuras lagunas glaciares en el Perú (modificado según Colonia et al., 2017; Frey et al., 2010).



<sup>1</sup> El presente resumen ejecutivo ha sido desarrollado en base al artículo científico de Colonia, D., Torres, J., Haerberli, W., Schauwecker, S., Braendle, E., Giraldez, C. & Cochachin, A. (2017). *Compiling an Inventory of Glacier-Bed Overdeepenings and Potential New Lakes in De-Glaciating Areas of the Peruvian Andes: Approach, First Results and Perspectives for Adaptation to Climate Change*. *Water*, 9 (5), 336. (DOI: 10.3390/w9050336).

<sup>2</sup> [www.ana.gob.pe/gestion-agua/cambio-climatico/page/2](http://www.ana.gob.pe/gestion-agua/cambio-climatico/page/2)

<sup>3</sup> [www.inaigem.gob.pe/](http://www.inaigem.gob.pe/)

El paso I consistió en el mapeo (desde el DEM) de partes de glaciares con pendientes de superficie <math><10^\circ</math>, como una preselección de sitios con potenciales depresiones de lechos. Este paso fue la base para enfocar el análisis visual de los tres indicadores morfológicos (paso

II, ver figura 2). El número de criterios morfológicos (CM) cumplidos para cada zona permitió la atribución de niveles de probabilidad o confianza sobre la existencia real de las depresiones de lechos glaciares identificados.

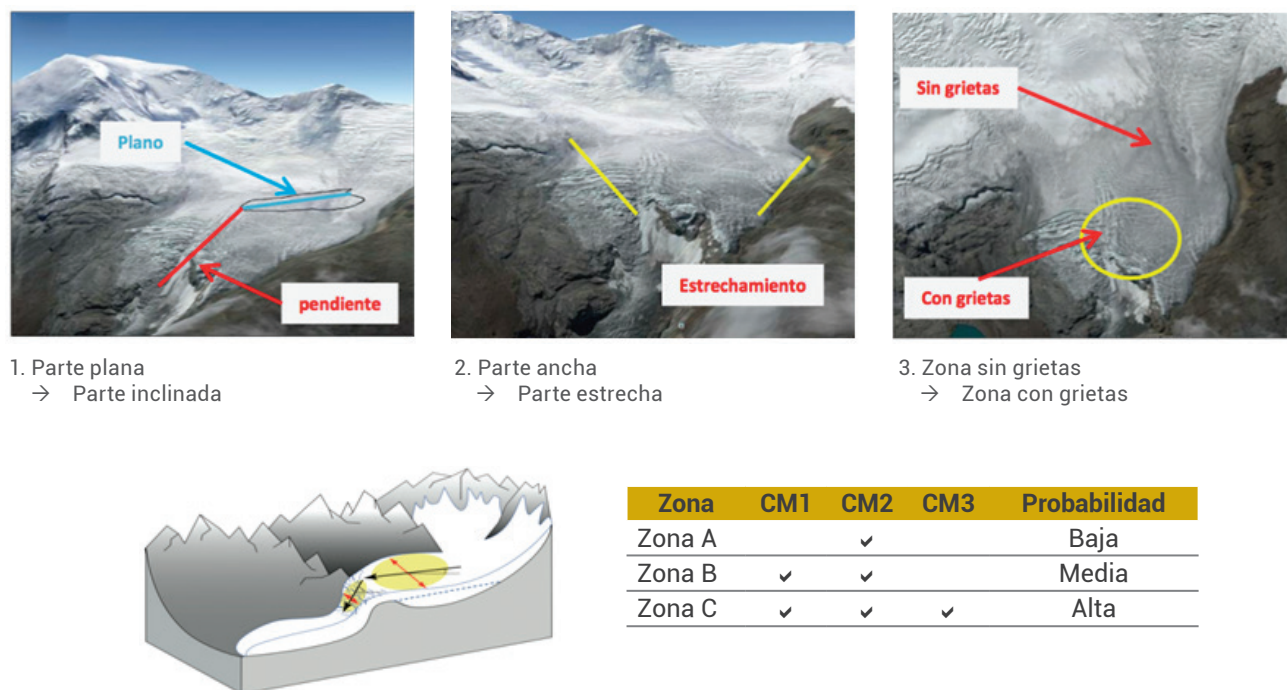


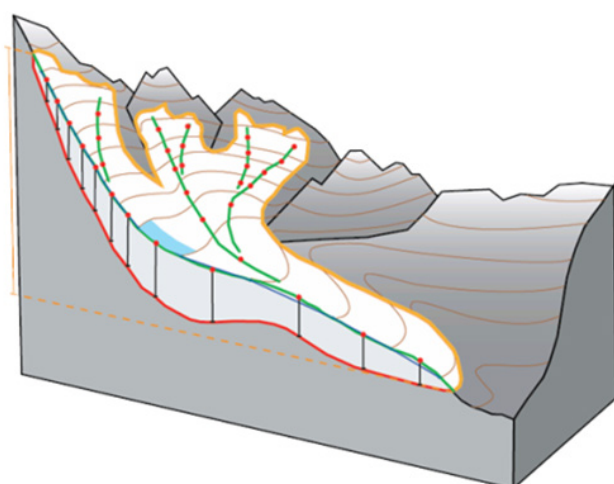
Figura 2. Paso II de la metodología: Criterios morfológicos que indican la existencia de depresiones en lechos glaciares (modificado según Colonia et al., 2017; Frey et al., 2010).

Los resultados de los dos primeros pasos se compararon con los resultados del modelo GlabTop, el cual se utiliza para estimar la distribución del espesor del hielo (Linsbauer et al., 2012; Linsbauer et al., 2009) a partir del análisis y la combinación del DEM, el contorno glaciar y las líneas de flujo (ver figura 3). La estimación de la

profundidad del hielo usando GlabTop, con un rango de incertidumbre de  $\pm 30\%$ , sólo puede proporcionar una valoración aproximada del orden de magnitud de las profundidades y volúmenes potenciales de las lagunas (Haerberli et al., 2016b; Linsbauer et al., 2012).

### MODELO GLABTOP

Estimación de espesor de hielo.



#### ENTRADAS

1. DEM
2. Límites del glaciar
3. Líneas de flujo

- Curva de nivel
- Contorno de glaciar
- Líneas de flujo
- Pendientes de la superficie
- Puntos base
- Interpolación de lecho glaciar

Figura 3. Paso III de la metodología: Modelamiento numérico (modificado según Linsbauer et al., 2012).

Un aspecto importante a considerar para la seguridad de las lagunas es si las potenciales nuevas reservas serán represadas por roca madre o si las morrenas existentes bloquearán su formación (Zemp et al., 2005). Como primer acercamiento a tal estimación, se puede suponer que los glaciares limpios con ausentes o pequeños escombros de paredes de roca circundantes cuentan con lechos rocosos; mientras que glaciares cubiertos de escombros tienden a tener lechos de material grueso y suelto (Haerberli & Fisch, 1984).

Con el fin de obtener una impresión aproximada del tiempo de inicio de formación de posibles futuras lagunas, esquemas simples de extrapolación pueden ser utilizados y aplicados rápidamente a glaciares no medidos sobre la base de información inventariada. Para el caso del Perú, con la data anteriormente recopilada en el primer y segundo inventario, se calculó el promedio anual de cambio horizontal y vertical del punto más bajo ( $h_{min}$ ) de cada glaciar (a lo largo de una línea de flujo asumida). Ambas tasas de cambio de posición del punto más bajo fueron extrapolados al futuro para cada glaciar individual. La comparación con la posición calculada y la elevación de las depresiones en los lechos glaciares

modelados proporcionaron un tiempo indicativo para el inicio de la formación de lagunas en caso de cambio continuo a tasas constantes. Los valores que reflejan posibles tendencias aceleradas de calentamiento global y retroceso de glaciares se obtuvieron duplicando las tasas medias de cambio y dividiendo en dos el tiempo hasta el inicio de la posible formación de lagunas. Este escenario de aceleración refleja un aumento en las pérdidas de área durante las últimas décadas alrededor del 1% por año a posiblemente cerca del 2% anual en un futuro próximo.

Basado en la estimación de tasas de cambio constante y acelerado, se hizo una distinción aproximada entre tres posibles periodos de formación de lagunas futuras:

- **Formación de lagunas ya en curso o inminentes (dentro de los próximos 10 años)**
- **Formación probable de lagunas durante la primera mitad del siglo (dentro de los próximos 10 a 40 años)**
- **Formación probable de lagunas alrededor de mediados de siglo o posterior (después de 40 años a más)**

## PERÚ: PRIMEROS RESULTADOS

Haciendo uso de la metodología anteriormente descrita, 201 sitios con depresiones en los lechos glaciares, cuyas áreas superan los 10 000 m<sup>2</sup>, fueron encontrados a lo largo de las cordilleras nevadas peruanas (ver tabla

Andes	Cuenca	Número
Norte	Santa	23
	Marañón	24
	Pativilca	5
	Huallaga	2
Centro	Mantaro	12
	Rímac	4
	Mala	1
	Perené	3
	Cañete	3
	Ocoña	8
	Camaná	1
	Alto Apurímac	6
Centro y Sur	Urubamba	67
Sur	Alto Madre de Dios	1
	Inambari	29
	Azángaro	5
	Suches	7
	<b>Total</b>	<b>201</b>

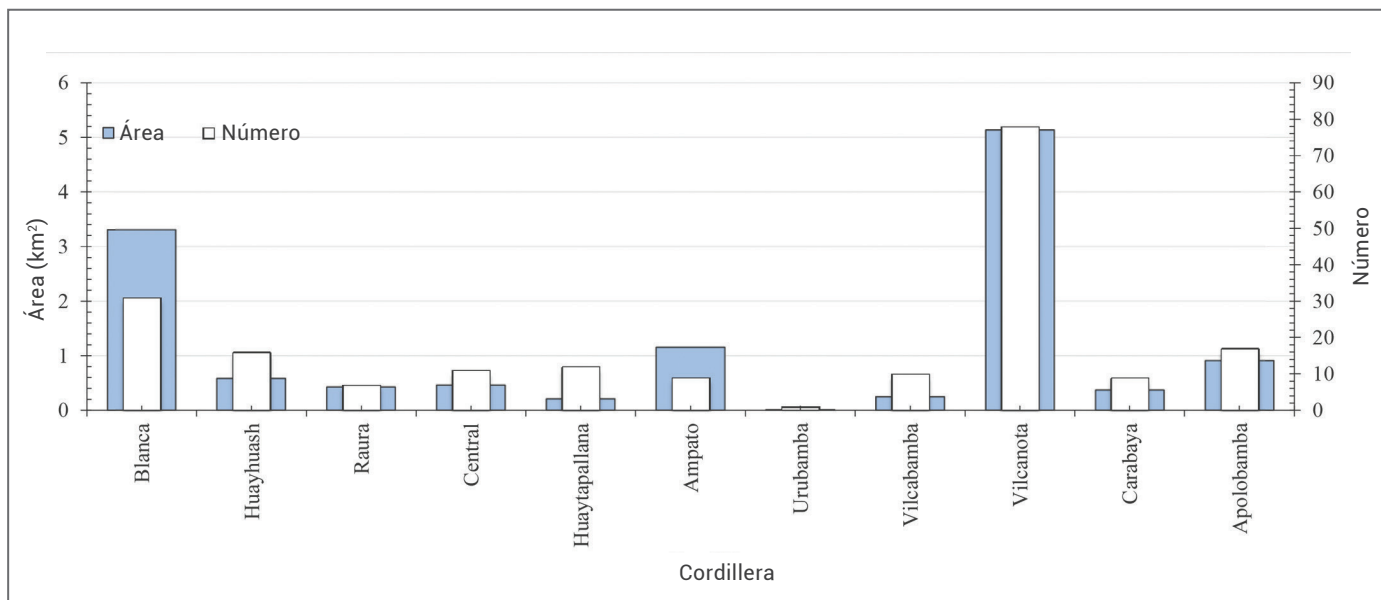
Tabla 1. Distribución de posibles futuras lagunas (>10,000 m<sup>2</sup>) por cuenca hidrográfica.

1 y tabla 2, figura 4). En estos lugares se determinó la posible formación de futuras lagunas con un volumen total de 260 millones de m<sup>3</sup>.

A partir de la comparación con el volumen glaciar nacional (38 km<sup>3</sup>) calculado para los años 2003 a 2010 en el segundo inventario de glaciares, el volumen potencial de las futuras lagunas correspondería entre 0.5 y 1% del volumen glaciar total. Ello se puede explicar debido a la limitada extensión de las partes planas en los glaciares de las cordilleras del Perú. Planas y despejadas lenguas glaciares, en contraste con zonas de descensos lentos de hielo cubierto de escombros, han desaparecido en el pasado reciente. Reflejo de este efecto es el número superior de posibles futuras lagunas a formarse en la cordillera Vilcanota, cuya meseta es plana y de gran altitud, en comparación con la cordillera Blanca y sus valles profundamente cortados.

Clasificación	Número
En curso o inminente	133
Primera mitad del siglo	43
Medios del siglo o posterior	25
<b>Total</b>	<b>201</b>

Tabla 2. Número de futuras lagunas por el tiempo inicial de formación.



**Figura 4.** Áreas y número de posibles futuras lagunas en las cordilleras del Perú. Se identificó un número importante de cadenas montañosas donde no se desarrollaría la formación de posibles futuras lagunas debido a que sus glaciares se ubican en pendientes pronunciadas y cuentan con áreas de pequeña cobertura.

La mayoría de las nuevas lagunas se formarán en las depresiones del lecho rocoso y, por lo tanto, presentarán represas estables. Sin embargo, la mayor parte de ellas también se constituirán cerca de pendientes de roca o morrenas y de picos rocosos extremadamente empinados por sobre los 5000 m.s.n.m., donde en muchos casos se exhibe un derretimiento paulatino del permafrost y glaciar. Este entorno de alta montaña

cambiante y desestabilizador viene a causar, a largo plazo, el probable aumento de grandes avalanchas de roca o hielo hacia estas lagunas. Por ende, los riesgos derivados del impacto de olas e inundaciones, incluso para la población e infraestructuras a distancias considerables río abajo, también van en aumento (*Haerberli et al., 2017*).

## CONCLUSIONES

- Los análisis de terreno, la inspección visual de la morfología y la geometría glaciar actual, en combinación con modelamientos numéricos, fueron óptimas técnicas utilizadas para alcanzar evaluaciones realistas, incluyendo la definición de niveles de probabilidad y confianza.
- Las predicciones más sólidas se refieren a la ubicación y al área aproximada de las depresiones de los lechos glaciares, mientras que la morfometría estimada relativa a su forma, profundidad o volumen exacto, proporciona órdenes de magnitud en lugar de valores claramente definidos.
- El volumen de 260 millones de m<sup>3</sup> en 201 sitios con depresiones de lechos modelados representa sólo del 0.5 al 1% del volumen de glaciares actualmente existentes. Esta pequeña proporción resulta del hecho de que la mayoría de las partes planas de los glaciares ya han desaparecido en las montañas investigadas, dejando en su mayoría glaciares pequeños y de pendiente pronunciada.
- Con más glaciares encogiéndose e incluso desapareciendo, se puede esperar que la tasa de formación de lagunas esté en declive. La mayoría de las futuras lagunas previstas probablemente entrarán en existencia dentro de las próximas décadas.
- Los primeros resultados expuestos para los glaciares de las cordilleras del Perú forman parte del proceso inicial de recopilación e inventario de posibles futuras lagunas a nivel nacional. La data recopilada en el segundo inventario de glaciares a nivel nacional (para los años 2003 a 2010) permitió conseguir esta primera aproximación. En este sentido, se resalta los avances del Perú en la recopilación y el análisis de data actual sobre glaciares, sin la cual no hubiese sido posible el desarrollo de la metodología expuesta.

## RECOMENDACIONES

- El proceso metodológico tuvo como insumo data glaciar actual, la cual podría ser utilizada en otras y futuras investigaciones relacionadas que lleven a la toma de decisiones y al desarrollo de políticas sostenibles a largo plazo. Por tal motivo, es imprescindible la **transferencia de esta información a las autoridades competentes** con el fin de darle aplicabilidad y utilidad práctica a la data presentada.
- Los resultados presentados para el Perú deben entenderse como una primera aproximación o estimación de orden de magnitud. En tal sentido, **es necesario aplicar métodos más sofisticados en caso se exhiba interés a nivel local-regional** (p. ej., los sondeos radio-eco). Esta información es crucial para lograr estimaciones más precisas de las futuras geometrías de las lagunas.
- Dada la probabilidad que la mayoría de nuevas lagunas con volúmenes importantes se están formando ahora y dentro de pocas décadas más, la **planificación a largo plazo debe poner fuerte énfasis en el almacenamiento y uso del agua**. En relación con los proyectos de suministro de energía hidroeléctrica o de abastecimiento de agua, investigaciones locales complementarían el establecimiento de planes para la construcción de presas.
- Con la conformación de potenciales nuevas lagunas viene la posibilidad del incremento de la vulnerabilidad y exposición de la población e infraestructuras, ubicadas aguas abajo, a posibles eventos extremos y de negativo impacto. Se recomienda a las autoridades competentes desarrollar un **análisis y evaluación aproximada del riesgo potencial relacionado**, que permita constituir una lista de prioridades donde se integre la necesidad de mayor investigación así como de acciones hacia una gestión del riesgo de desastre, principalmente en regiones y zonas de alta montaña aledañas a glaciares.
- Nuevos potenciales de uso y almacenamiento de agua, que ofrecen las lagunas formadas, deben estar abordados adecuadamente mediante un **proceso participativo a través de una gestión integrada de recursos hídricos, garantizando la sostenibilidad y reconociendo los múltiples usuarios de agua** a fin de evitar competencias y conflictos sobre el escaso recurso en algunas regiones.

## REFERENCIAS

- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2012). *Inventario Nacional de Glaciares y Lagunas*. Autoridad Nacional del Agua: Lima.
- Colonia, D., Torres, J., Haeberli, W., Schauweckers, S., Braendle, E., Giraldez, C. & Cochachin, A. (2017). Compiling an Inventory of Glacier-Bed Overdeepenings and Potential New Lakes in De-Glaciating Areas of the Peruvian Andes: Approach, First Results and Perspectives for Adaptation to Climate Change. *Water*, 9 (5), 336. <https://doi.org/10.3390/w9050336>
- Drenkhan, F., Guardamino, L., Huggel, C. & Frey, H. (in review). *Current and future glacier and lake assessment in the deglaciating Vilcanota-Urubamba basin, Peruvian Andes*.
- Frey, H., Haeberli, W., Linsbauer, A., Huggel, C., & Paul, F. (2010). A multi - level strategy for anticipating future glacier lake formation and associated hazard potentials. *Natural Hazards and Earth System Science*, 10 (2), 339 - 352. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-339-2010>.
- Haeberli, W., & Fisch, W. (1984). Electrical resistivity soundings of glacier beds: A test study on Grubengletscher Wallis, Swiss Alps. *Journal of Glaciology*, 30, 373 - 376. <https://doi.org/10.1017/S0022143000006250>
- Haeberli, W., Bütler, M., Huggel, C., Lehmann, T., Schaub, Y., & Schleiss, A. (2016 a). New lakes in deglaciating high - mountain regiones: Opportunities and risks. *Climate Change*, 139 (2), 201 - 214. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1771-5>
- Haeberli, W., Linsbauer, A., Cochachin, A., Salazar, C., & Fischer, U. H. (2016b). On the morphological characteristics of overdeepenings in high - mountain glacier beds. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41 (13), 1980 - 1990. <https://doi.org/10.1002/esp.3966>
- Haeberli, W., Schaub, Y., & Huggel, C. (2017). Increasing risks related to landslides from degrading permafrost into new lakes in de - glaciating mountain ranges. *Geomorphology*. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.02.009>
- Linsbauer, A., Paul, F., & Haeberli, W. (2012). Modeling glacier thickness distribution and bed topography over entire mountain ranges with GlabTop: Application of a fast

and robust approach. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(3), 1 - 17.  
<https://doi.org/10.1029/2011JF002313>


Linsbauer, A., Paul, F., Hoelzle, M., Frey, H., & Haeberli, W. (2009). The Swiss Alps without glaciers: A GIS-based modelling for reconstruction of glacier beds. *Proceedings of the Geomorphometry*, 243-247.

Salzmann, N., Kääh, A., Huggel, C., Allgöwer, B., & Haeberli, W. (2004). Assessment of the hazard potential of ice avalanches using remote sensing and GIS-modelling. *Norwegian Journal of Geography*, 58(2), 74 - 84.  
<http://dx.doi.org/10.1080/00291950410006805>

Zemp, M., Kääh, A., Hoelzle, M., & Haeberli, W. (2005). GIS-based modelling of the glacial sediment balance. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 138, 113 - 129.

La producción de este documento fue posible gracias al Proyecto Glaciares+, iniciativa de la cooperación Suiza-Perú en el marco del Programa Global de Cambio Climático y Medio Ambiente de la Agencia Suiza para la Cooperación y el Desarrollo (COSUDE), ejecutado por CARE Perú y el consorcio suizo liderado por la Universidad de Zurich, y conformado por Meteodat, el Centro de Investigación del Medio Alpino (CREALP) y la Escuela Politécnica Federal de Lausana (EPFL).

El proyecto se realiza en estrecha coordinación con la Autoridad Nacional del Agua (ANA), el Ministerio del Ambiente (MINAM) y el Centro de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED); y es implementado por la Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos (UGRH) de la ANA, gobiernos regionales de Ancash, Cusco y Lima, gobiernos y universidades locales.

 Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Embajada de Suiza en el Perú

Agencia Suiza para el Desarrollo  
y la Cooperación COSUDE



**PROYECTO  
GLACIARES+**  
Más allá de los riesgos hacia  
las oportunidades



University of  
Zurich <sup>UZH</sup>



#### Socios y aliados PG+



**PERÚ** Ministerio  
del Ambiente

 **ANA**  
Autoridad Nacional del Agua

 **CENEPRED**  
Centro Nacional de Estimación, Prevención y  
Reducción del Riesgo de Desastres  
"Promoviendo Cultura de Prevención"

 **APCI**  
Agencia Peruana de Cooperación Internacional

 **GOBIERNO REGIONAL DE LIMA**



 **Gobierno Regional  
CUSCO**  
Caminemos juntos



Download and view the article *Compiling an Inventory of Glacier-Bed Overdeepenings and Potential New Lakes in De-Glaciating Areas of the Peruvian Andes: Approach, First Results and Perspectives for Adaptation to Climate Change*.



Download and view english version of the *Executive Brief*.