



PROYECTO GLACIARES+

Más allá de los riesgos hacia
las oportunidades

VARIABLES Y FACTORES A CONSIDERAR EN EL ANÁLISIS DEL CLIMA FUTURO Y DE LOS GLACIARES DEL PERÚ¹

Los glaciares desempeñan un rol crucial en el ciclo del agua o ciclo hidrológico, almacenando precipitación sólida (nieve o hielo) durante la época de lluvias y liberando agua durante la época de estiaje o sequía. De los glaciares tropicales² a nivel mundial, el Perú posee el 71% del total en gran parte de sus cordilleras (ANA, 2012). Durante las últimas décadas, se ha observado un retroceso significativo de estos reservorios de agua dulce. Desde el primer Inventario Nacional de Glaciares de 1970, la cordillera Vilcanota ha presenciado la reducción del 33% de su área glaciar (hasta el año 2009), mientras que en la cordillera Blanca, el 27% del área se perdió en el periodo 1970-2003 (ANA, 2012). Para la cordillera Central, la extensión glaciar disminuyó en un 56% entre los años 1970 y 2007 (ANA, 2012). En la actualidad, si bien no hay respuestas definitivas sobre el futuro de los glaciares peruanos, es posible esbozar algunos postulados considerando factores e indicadores climatológicos y ambientales, a partir de lo cual se deben tomar medidas adecuadas de adaptación según características locales y/o regionales.

EL FUTURO DEL CLIMA

El retroceso o acumulación del volumen glaciar está directamente relacionado con los cambios climáticos a suscitarse. Para estudiar el futuro del clima, las interacciones complejas entre la atmósfera, la tierra, los océanos y el hielo se simulan con diferentes modelos climáticos (GCMs, por sus siglas en inglés). Como insumos de los modelos, se utilizan escenarios que estiman cambios en el flujo de energía radiativa (calor) hacia la superficie terrestre, ya sea producto de variaciones en la composición atmosférica (p. ej., aumento concentración de dióxido de carbono), uso de suelos, factores externos (p. ej., variación en la actividad solar), entre otros. Los RCPs (Representative Concentration Pathways) son escenarios usados por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) en su **Quinto Informe (AR5)** de los años 2013 y 2014. En él, el IPCC desarrolló cuatro escenarios de forzamiento radiativo (2.6, 4.5, 6 y 8.5 W/m²) con un horizonte de tiempo

hasta finales del siglo XXI. Mientras que el escenario más pesimista (RCP8.5) estima que la concentración de gases de efecto invernadero va a seguir aumentando durante el siglo a grandes tasas, el escenario más optimista (RCP2.6) asume que las emisiones disminuirán después de los años 2010-2020.

A partir de la incorporación de distintos escenarios, los resultados de los modelos permiten estimar futuros cambios en variables e indicadores climáticos:

En relación a la **temperatura**, si se asume un escenario de emisión pesimista, habrá un incremento de aproximadamente 4°C para el Perú hacia fines del siglo XXI (IPCC, 2014). Este calentamiento probablemente será más intenso en regiones de gran altitud como los Andes tropicales, comparado con el calentamiento promedio

¹ El presente resumen ejecutivo ha sido desarrollado en base al informe *El futuro del clima y de los glaciares en el Perú, un resumen preliminar redactado por Simone Schauwecker y Mario Rohrer (Meteodat) y el artículo científico The freezing level in the tropical Andes, Peru: An indicator for present and future glacier extents, publicado en el Journal of Geophysical Research Atmospheres, 122(10), 5172 - 5189. (DOI: 10.1002/2016JD025943). Asimismo, se incluye el aporte proporcionado por Rolando Cruz de la UGRH-ANA.*

² Los glaciares son masas de hielo o nieve localizados a gran altitud en la superficie terrestre. Un conjunto de aquellas reservas de agua dulce se ubica en la zona tropical (entre los trópicos de Cáncer y Capricornio), caracterizada por altas temperaturas y gran cantidad de precipitación.

en el mundo. No obstante, el aumento estimado de la temperatura depende mucho del escenario de emisión, pues algunos escenarios duplican las tasas de calentamiento de otros (*Boulangier et al.*, 2006).

La **altura de congelación** es el nivel más bajo de la atmósfera donde se encuentra una temperatura de 0°C (figura 1). Esta variable climatológica está directamente relacionada con la temperatura del aire, por lo que el aumento de esta última se refleja en un aumento de la isoterma (aproximadamente 150 m por 1°C).

La capacidad de los modelos climáticos de simular cambios en la **precipitación** de los Andes es reducida debido

a su compleja topografía y grandes diferencias de elevación. Estas limitaciones se manifiestan en proyecciones con una incoherencia alta y grandes incertidumbres. Debido a estos inconvenientes, se determina estimar la precipitación a partir de los vientos zonales, al proceder mayor parte de la humedad de las precipitaciones de los Andes del Perú y ser transportada por los vientos del este. Los modelos muestran conjuntamente un cambio en el viento de la tropósfera alta durante el siglo XXI. Bajo el escenario pesimista o RCP8.5, se exhibe una reducción del viento del este que generaría la disminución de la precipitación en un rango de 19-33% durante la estación húmeda (diciembre, enero y febrero) comparado con la situación actual (*Neukom et al.*, 2015).

EL FUTURO DE LOS GLACIARES

Existe una reducida cantidad de estudios sobre el futuro de los glaciares en el Perú. Debido a la compleja interacción entre los glaciares y el clima, no es sencillo predecir futuros cambios en el área y volumen de los glaciares. El entendimiento de esta interacción precisa de modelos complejos cuyas simulaciones requieren mediciones detalladas como insumos, lo cual no es factible de desarrollar en los Andes peruanos al carecer de data y mediciones a grandes altitudes.

Sin embargo, la **altura de congelación** puede ser utilizada como un indicador durante la estación húmeda, ya que permite dar una estimación aproximada de la extensión futura de los glaciares en aquellas zonas donde no se cuenta con datos suficientes para la ejecución de modelos (*Schauwecker et al.*, 2017). Debajo de la altura de congelación, gran parte de la precipitación cae como lluvia, lo cual no aporta a la acumulación de los glaciares. Además, la superficie de la lengua del glaciar³ debajo de la altura de congelación es mayormente hielo y no nieve. Por ello, gran

cantidad de la radiación solar es absorbida y usada para derretir el hielo. De esta manera, solo una mínima porción del área glaciar se encuentra debajo de la altura de congelación. De aumentar aquella altura, se asume que el área glaciar debajo de ese nivel disminuirá rápidamente.

En base a estos postulados, se puede estimar la futura extensión de los glaciares con los resultados de los modelos climáticos y los escenarios RCP2.6 y RCP8.5. Según proyecciones, la altura de congelación aumentará en 230 m (± 190 m) bajo el escenario RCP2.6. La figura 1b muestra el área en azul claro donde el hielo se derretirá a partir de la elevación de la isoterma (simulada para el RCP2.6 con una línea verde). Bajo el escenario más pesimista RCP8.5, el aumento será acelerado y aproximadamente tres veces más fuerte (en 850 m/ ± 390 m), comparado con el aumento de las últimas décadas (similar al RCP2.6). A partir de este escenario, únicamente se preservarán las áreas glaciares por encima de la nueva altura de congelación (simbolizada con una línea roja en la figura 1b).

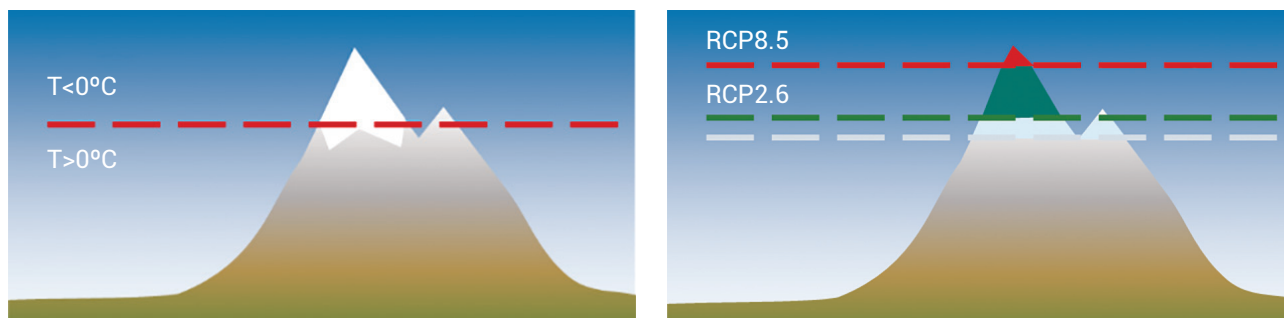


Figura 1. a) La altura de congelación bajo condiciones normales (línea roja). b) La altura de congelación actual (línea gris), y hasta fines del siglo XXI asumiendo los escenarios de emisión optimista RCP2.6 (línea verde) y pesimista RCP8.5 (línea roja). La franja ploma simboliza las elevaciones que están actualmente arriba de la altura de congelación; verde y rojo simbolizan las elevaciones que estarán arriba de la altura de congelación hasta fines del siglo asumiendo los escenarios RCP2.6 y RCP8.5, respectivamente.

³ La lengua glaciar es la parte del glaciar localizada pendiente abajo por acción de la gravedad, extendiéndose hasta penetrar en el valle.

La figura 2 muestra la ubicación actual y proyectada de la isoterma de 0°C en las cordilleras Blanca, Vilcanota y Central, según escenario de emisión. Aproximadamente el 15% del área total de las cordilleras Vilcanota y Blanca se encuentra por debajo de la altura de congelación actual. Con un aumento en la isoterma bajo el escenario RCP2.6, aproximadamente el 50% del área glaciar actual estará por debajo de ese nivel. En tal sentido, aun con el escenario más optimista, se perderá una parte

significativa del área glaciar durante el próximo siglo. Bajo el escenario RCP8.5, la altura de congelación se encontrará por debajo de las cumbres más altas, permaneciendo únicamente pequeñas áreas glaciares o de neviza. En otras cordilleras, donde las cumbres más altas están a menores altitudes de la altura de congelación proyectada (caso de la cordillera Central), los glaciares desaparecerán completamente bajo del escenario pesimista.

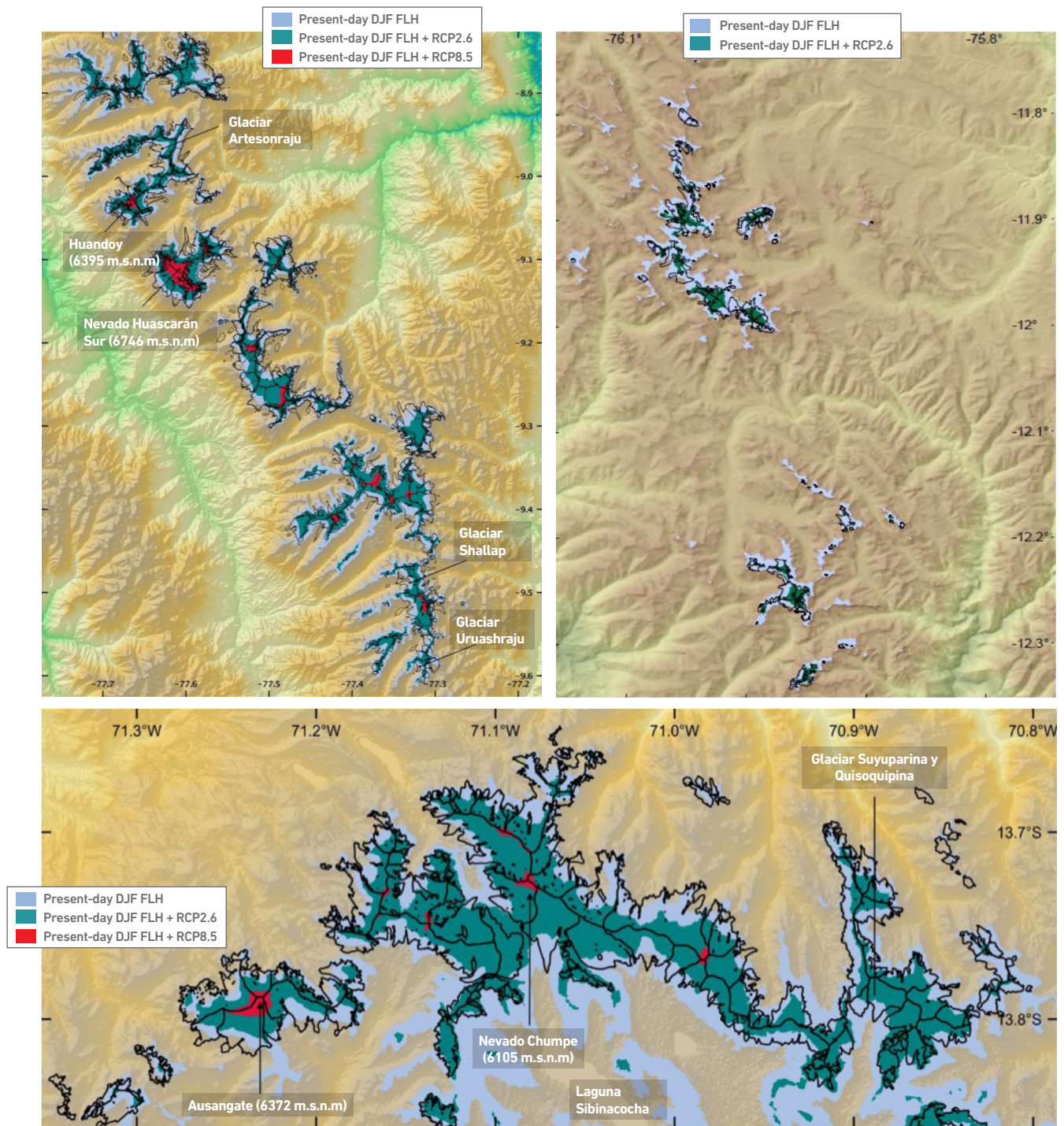


Figura 2. La isoterma de cero grados en la cordillera Blanca (superior izquierda), Central (superior derecha) y Vilcanota (inferior centro). El color azul claro simboliza las elevaciones que están actualmente por encima de la altura de congelación. Verde y rojo simbolizan las elevaciones que estarán por encima de la isoterma hasta fines del siglo XXI asumiendo los escenarios de emisión RCP2.6 y RCP8.5, respectivamente. Líneas negras indican los límites de los glaciares. "Present-day DJF FLH": Isoterma de cero grados actual (dic-feb) (Schauwecker et al., 2017).

Otro posible indicador a considerar en la preservación de los glaciares está relacionado con la contaminación ambiental. Recientes estudios (2016) realizados en la cordillera Blanca por la Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos (UGRH) de la Autoridad Nacional del Agua (ANA), analizaron muestras de **aerosoles**⁴ (sedimentos) depositados en la zona de ablación de los glaciares Artesonraju, Yanamarey y Pastoruri. El resultado de este análisis físico-químico evidenció la presencia de altas concentraciones de metales pesados (tales como hierro, aluminio, plomo, zinc y arsénico) y nutrientes (fosfatos y nitratos) en la muestra.

El presente análisis fue complementado con una investigación experimental en el glaciar Artesonraju. Esta consistió en limpiar un área de 1 m² (remover la capa superficial con

sedimentos) para analizar los efectos de los aerosoles sobre la superficie glaciar, a partir de su comparación con un área no intervenida. Los resultados mostraron que el área intervenida (sin aerosoles) presentaba un incremento del valor de su albedo, evidenciado en la conservación del 58% (2.1 m) de la altura (masa) glaciar hacia finales del periodo de estudio (junio a octubre 2016). Los materiales acarreados por los vientos son, en muchos casos, contaminantes que por sus características y color oscuro absorben la energía solar. En una superficie glaciar, esto se traduce en un derretimiento acelerado, con consecuencias e impactos negativos aguas abajo. En tal sentido, los efectos del cambio climático en los glaciares se ven reforzados por la contaminación ambiental, siendo el aerosol una variable importante a considerar en la fusión y el derretimiento glaciar.



Figura 3. Mediciones de la altura conservada con balizas de control en el área experimental. Las fotografías muestran el valor del albedo del área circundante al área experimental, así como la altura de masa preservada en esta última según cada fecha de medición (UGRH-ANA, 2016).

CONCLUSIONES

- El futuro del clima se analiza y estudia en base a simulaciones de modelos climáticos, a partir de los cuales se estiman cambios en las variables climatológicas según el escenario de emisión utilizado (optimista o pesimista).
- La altura de congelación puede servir como un indicador aproximado de la extensión futura de los glaciares tropicales, principalmente en aquellas regiones de alta montaña que carecen de mediciones y data climatológica. Junto con los resultados de los modelos climáticos y escenarios de emisión, permite estimar el porcentaje de área glaciar a perderse hacia fines del siglo XXI.
- En relación al futuro de los glaciares del Perú, un alto porcentaje del área y volumen glaciar (alrededor del 50%) se perderá inclusive con el escenario más optimista (RCP2.6). Bajo el escenario RCP8.5, solamente del 1 al 5% del área glaciar permanecerá en las cumbres más altas.
- Los aerosoles depositados sobre la superficie glaciar, en base a procesos atmosféricos y de origen antrópico-natural, deben considerarse como variables incidentes de la fusión glaciar, las cuales refuerzan los efectos del cambio climático. El trabajo experimental en el glaciar Artesonraju (cordillera Blanca) evidenció su efecto mediante la remoción de una capa superficial con sedimentos para un área de 1 m². La limpieza de esta zona permitió conservar el 58% de la altura (masa) glaciar, a diferencia del área circundante (con aerosoles).
- Los cambios inminentes en los glaciares del Perú afectarán, a largo plazo, la disponibilidad de recursos hídricos en muchas zonas a nivel local y/o regional. La toma de acciones inmediatas por parte de las autoridades competentes se hace necesaria para evitar futuras pérdidas económicas y de inversión.

⁴ El aerosol se constituye de partículas sólidas (polvo o humo) o líquidas suspendidas en el aire, cuyo tamaño puede variar entre 0.002 a más de 100 μm (Hinds, 1999).

RECOMENDACIONES

- Una fuerte **reducción de emisión de gases de efecto invernadero** a nivel global, con una **mitigación** exitosa, podría permitir mantener un clima correspondiente a un escenario optimista donde se preserve aproximadamente el 50% del área glaciar. Al contrario, una política de mitigación fallida (RCP8.5) implicaría la pérdida casi total de los glaciares del Perú.
- Es necesaria una mayor **promoción de la investigación** por parte de las instituciones técnico-científicas competentes, a fin de proveer estimaciones más precisas para escalas espaciales y temporales cortas.
- En el contexto de una posible reducción de la disponibilidad de agua y el potencial de conflictos relacionados, una **gestión integrada del agua** se hace imprescindible. Es un eje principal de la adaptación al cambio climático en zonas afectadas. Se considera fundamental que esta gestión se organice de modo **participativo** e incluya a todos los actores y usuarios del agua de una cuenca y/o región.
- Se considera fundamental que todos los actores tengan **acceso a la información** y data hidrometeorológica generada. Esto podría mejorar los conocimientos del cambio climático de los actores y permitir un diálogo en pie de igualdad.
- Se hace imprescindible una **priorización presupuestal** en pro de un **aprovechamiento sostenible de los recursos hídricos, gestión del riesgo de desastre y adaptación al cambio climático** a largo plazo.
- Por parte del gobierno (local, regional y nacional), se requiere la **incorporación de escenarios climáticos en la planificación y proyección territorial**, lo cual permitirá estimar los efectos del retroceso glaciar y, en función a ello, prever demandas de bienes y servicios públicos a ser abastecidas mediante proyectos de inversión. Proyectos tales como de irrigación, almacenamiento de agua, infraestructura hidráulica, entre otros, deben tomar en consideración estos escenarios a fin de desarrollar una estimación correcta de la oferta hídrica futura; información indispensable a presentar en proyectos financiados por fondos públicos.

REFERENCIAS

Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2012). *Inventario Nacional de Glaciares y Lagunas*. Autoridad Nacional del Agua: Lima.

Boulanger, J.P., Martinez, F., & Segura, E. (2006). Research for mountain area development: climatic fluctuations in the mountains of the Americas and their significance. *Ambio*, 29(7), 233 - 259.

Hinds, W. C. (1999). *Aerosol Technology Properties Behavior and Measurement of Airborne Particles*. John Wiley and Sons: New York.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability, Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press: Cambridge and New York.

Neukom, R., Rohrer, M., Calanca, P., Salzmänn, N., Huggel, C., Acuña, D., Christie, D. A., & Morales, M.S. (2015). Facing unprecedented drying of the Central Andes? Precipitation variability over the period AD 1000 - 2100. *Environmental Research Letters*, 10(8). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/8/084017>


Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., Gomez, J., Cáceres, B., Ceballos, J. L., Basantes, R., Vuille, M., Sicart, J. E., Huggel, C., Scheel, M., Lejeune, Y., Arnaud, Y., Collet, M., Condom, T., Consoli, G., Favier, V., Jomelli, V., Galarraga, R., Ginot, P., Maisincho, L., Mendoza, J., Ménégoz, M., Ramirez, E., Ribstein, P., Suarez, W., Villacis, M., & Wagnon, P. (2013). Current state of glaciers in the tropical Andes: a multicentury perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere*, 7(1), 81 - 102. <https://doi.org/10.5194/tc-7-81-2013>

Salzmänn, N., Huggel, C., Rohrer, M., Silverio, W., Mark, B. G., Burns, P., & Portocarrero, C. (2013). Glacier changes and climate trends derived from multiple sources in the data scarce Cordillera Vilcanota region, southern Peruvian Andes. *The Cryosphere*, 7, 103 - 118. <https://doi.org/10.5194/tc-7-103-2013>

Schauwecker, S., Rohrer, M., Huggel, C., Endries, J., Montoya, N., Neukom, R., Perry, B., Salzmänn, N., Schwarb, M., & Suarez, W. (2017). The freezing level in the tropical Andes, Peru: An indicator for present and future glacier extents. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 122(10), 5172 - 5189. <https://doi.org/10.1002/2016JD025943>

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 ^{UZH}



METEODAT GMBH

Hydrologie · Meteorologie · Klimatologie · Energie
Technoparkstrasse 1 · CH-8005 Zürich · www.meteodat.ch

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



Visualice y descargue el informe
*El futuro del clima y de los
glaciares en el Perú.*



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