

Algunas respuestas antes de leer este documento:

- **¿Qué es un proyecto de ingeniería multipropósito?**

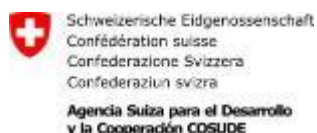
Se denomina así a un esfuerzo de ingeniería que busca lograr objetivos conjuntos y soluciones integrales a determinados problemas. En este caso, a la gestión de riesgo de desastres por desembalse de las lagunas en las zonas altonandinas del Perú.

- **¿Cuál es su importancia para las zonas de intervención del Proyecto Glaciares 513?**

Su importancia radica en que es una herramienta útil para visualizar resultados y soluciones integrales a los problemas que afectan una subcuenca por la amenaza de desborde y avalancha. En este caso se visualiza no solo las soluciones hidráulicas, si no que se plantea propuestas que pueden incluir actividades que fomenten el desarrollo en la zona como es la construcción de centrales hidroeléctricas y el fomento de la actividad turística.

ESTUDIOS PRELIMINARES SOBRE CLIMA, ADAPTACIÓN Y COMUNIDAD DEL PROYECTO GLACIARES EN EL DISTRITO DE SANTA TERESA - GLACIARES 513 EN CUSCO -	ESTUDIOS PRELIMINARES SOBRE CLIMA, ADAPTACIÓN Y COMUNIDAD DEL PROYECTO GLACIARES EN LA PROVINCIA DE CARHUAZ - GLACIARES 513 EN ANCASH -
SECCIÓN 4: HERRAMIENTAS PARA LOS ESTUDIOS DE ADAPTACIÓN UTILIZADOS EN EL PROYECTO GLACIARES	SECCIÓN 4: HERRAMIENTAS PARA LOS ESTUDIOS DE ADAPTACIÓN UTILIZADOS EN EL PROYECTO GLACIARES
ALTERNATIVAS PARA LA ADAPTACIÓN AL RETROCESO GLACIAR Y SUS CONSECUENCIAS: PROTECCIÓN FRENTE A INUNDACIONES, GESTIÓN DE LAS NECESIDADES HÍDRICAS Y APROVECHAMIENTOS HIDROELÉCTRICOS	

PROYECTOS DE INGENIERÍA MULTIPROPÓSITO, INCLUYENDO PROTECCIÓN CONTRA CRECIDAS, PRODUCCIÓN DE ENERGÍA Y DEMANDA DE AGUA EN LAS CORDILLERAS PERUANAS: PRINCIPIOS, POTENCIAL Y DESAFÍOS



PROYECTO GLACIARES

Adaptación al cambio climático y reducción de riesgos de desastres por el retroceso de los glaciares en la Cordillera de los Andes



University of Zurich
UZH



Authors:

Wilfried Haeberli¹, Javier García^{2,3}, Sebastián Guillén²

¹ *Institute of Geography, University of Zurich, Switzerland*

² *Laboratory of Hydraulic Constructions, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland*

³ *Centro de Investigación sobre el Medio Alpino (CREALP), Sion, Switzerland*

With comments and contributions by

Christian Huggel and Luis Vicuña (University of Zurich, Switzerland), Cesar Portocarrero (Independent Expert, Peru).

Resumen

La Cordillera de los Andes, como muchas otras regiones montañosas del mundo, se ve afectada por el fenómeno del retroceso glaciar y los impactos del cambio climático. Algunos de sus efectos son la reducción de la aportación de agua de origen glaciar a las cuencas hidrográficas y la formación de nuevas lagunas que constituyen una atracción turística y tienen un potencial energético importante. Estas lagunas representan además una amenaza potencial por la posibilidad de que avalanchas de hielo y rocas caigan sobre la laguna y provoquen su desborde y consiguiente inundación aguas abajo.

Los proyectos multipropósito ofrecen alternativas para la adaptación al retroceso glaciar y sus consecuencias, combinando medidas para la protección frente a inundaciones, gestión de las necesidades hídricas y aprovechamientos hidroeléctricos. En este documento se ponen de manifiesto los aspectos científico-técnicos a analizar en dichos proyectos multipropósito. Cuatro casos han sido seleccionados a modo de ejemplo para ilustrar los condicionantes y retos que plantea el retroceso glaciar. Se establecen una serie de recomendaciones para facilitar futuros análisis más detallados y se definen pasos para la toma de decisión de las medidas a adoptar.

1. Introducción

Tras el evento ocurrido en el año 2010 en la Laguna 513 del Nevado Hualcán¹, situado en la Cordillera Blanca en la región de Ancash, se han considerado varias medidas para la reducción de riesgos en la zona. Estas medidas incluyen la posibilidad de combinar la protección frente a inundaciones junto con la mejora de las garantías del suministro de agua en épocas secas y la producción de energía eléctrica. Estas consideraciones han pasado a ser parte del “Proyecto Glaciares” y son desarrolladas por el consorcio de colaboración Suizo-Peruano a través del estudio de los procesos, potencialidades y retos relacionados con el fenómeno del retroceso glaciar a través de los proyectos multipropósito. El caso de la Pampa Shonquil, al pie del Nevado Hualcán, se trata en el capítulo 4. Este caso tiene un carácter general que puede ser aplicado a las cordilleras peruanas en vista de los cambios en el ciclo del agua provocados por el impacto del cambio climático sobre los glaciares.

Los riesgos relacionados con inundaciones catastróficas y flujos de escombros provocados por el desbordamiento de lagunas creadas por el retroceso glaciar, están normalmente asociados a bajas probabilidades y efectos de grandes magnitudes. Esto conlleva que las obras necesarias para la retención de una eventual inundación sean costosas y que sea más útil considerar múltiples usos para las mismas. La infraestructura en la Laguna Parón² (ver caso de estudio 4.2), en la Cordillera Blanca, es un trabajo pionero de este tipo. Fue construida con la finalidad de proteger a largo plazo a la población local y los bienes de las consecuencias del cambio climático.

Incluso sin considerar múltiples usos, la construcción de diques de retención puede ser una solución segura y económica, siempre dentro del marco de un concepto integral de gestión de riesgo. Para esto la instalación de un sistema de alerta temprana (SAT) puede ser una medida complementaria, aunque es importante tener en cuenta que un SAT requiere de un mantenimiento continuo e intensivo. Un dique de retención en la laguna eliminaría o por lo menos reduciría de manera efectiva el daño potencial. Además, puede ser mantenido durante largos periodos de tiempo debido a su reducido costo de mantenimiento.

Este dique puede construirse al mismo tiempo que un túnel de salida de agua con el objetivo de disminuir el volumen de la laguna y disponer de un volumen de seguridad suplementario. La presa de materiales sueltos de 6 metros de altura en Jatuncocha (ver 4.1) es un ejemplo de eficacia en la Cordillera Blanca, relacionado con el desbordamiento de la Laguna Artisón Chica en el Valle de Santa Cruz, el pasado Febrero de 2012.

El objetivo de este documento es plantear unas directrices que sirvan de base para análisis más detallados y futuras planificaciones. En éste se compilan aspectos científico-técnicos básicos sobre los fenómenos implicados en los efectos del cambio climático en alta montaña, tipos de construcciones y condicionantes, logística y costos.

¹ En abril del año 2010, un bloque del glaciar Hualcán cayó sobre la laguna 513, generando un aluvión que afectó a los poblados de Hualcán, Acopampa, Obrabaje, Queshuipachán y Pariacaca, todos en la provincia de Carhuaz. <http://www.larepublica.pe/12-04-2010/panico-en-carhuaz-por-aluvion>

² La Laguna Parón es otra laguna de la cordillera Blanca, ubicada en las alturas de la provincia de Caraz, a pocos kilómetros de la provincia de Carhuaz.

Se han tomado como ejemplos cuatro casos de estudio situados en la Cordillera Blanca: Artesonraju/Parón, Arhuaycocha/Jatuncocha, Laguna 513/Pampa de Shonquil, y laguna Palcacocha). El documento también establece una serie de recomendaciones generales relativas a posibles nuevos proyectos multipropósito a tener en cuenta como primera base de desarrollo.

2. Marco científico y técnico

2.1 *Glaciares, agua y topografía en las Cordilleras Peruanas*

Salvo algunas excepciones (por ejemplo, Karakorum³), los glaciares de montaña están retrocediendo rápidamente (WGMS⁴ 2008). Desde el último máximo de extensión glaciario de la Pequeña Edad de Hielo (alrededor del siglo XIX) se han registrado grandes disminuciones de la cobertura de hielo y de los volúmenes de los glaciares. Esta disminución parece ir en aumento. Análisis recientes de imágenes satélite de alta resolución indican un aumento en las pérdidas en los Andes Tropicales (Rabatel, et al 2013). Bajo las condiciones del impacto del ser humano sobre el clima (aumento del efecto invernadero), las tendencias de calentamiento atmosférico y retroceso glaciario van a continuar en el futuro.

En la actualidad, se están realizando grandes esfuerzos para modelar escenarios futuros de cambio climático y desaparición de glaciares a escala de cordilleras completas. Estas simulaciones están basadas en inventarios glaciares, modelos digitales de terreno y escenarios climáticos. Estos datos proporcionan la base de conocimiento para evaluar los impactos económicos y ambientales de estos fenómenos que a su vez, permiten la planificación de estrategias de adaptación. En regiones de alta montaña, tales estrategias están basadas en primer lugar en las condiciones de riesgo, los cambios en el abastecimiento de agua y el potencial hidroeléctrico, además de cambios en el paisaje con connotaciones turísticas (Haeberli et al. 2013).

Un gran número de lagunas pueden formarse allá donde los glaciares desaparecen (Linsbauer et al. 2012). En las cordilleras peruanas, ya existen muchas lagunas y se prevé la formación de nuevas lagunas en el futuro. Éstas pueden ser turísticamente atractivas, además de interesantes desde el punto de vista hidroeléctrico, pero también constituyen una seria amenaza para poblaciones e infraestructuras (Carey et al 2012a). Como amenaza principal, las olas creadas por el impacto de avalanchas de hielo y rocas sobre su superficie pueden producir su desborde y los consiguientes aluviones de agua y flujos de escombros con efectos devastadores a grandes distancias aguas abajo en el valle.

³ La cordillera del Karakórum (del turco: "pedregal negro") es, con el Himalaya, una de las grandes cordilleras de Asia, situada en la frontera entre Pakistán, la India y China. Tiene una longitud de unos 500 km y es la región del mundo con más glaciares fuera de las regiones polares. (Wikipedia)

⁴ World Glacier Monitoring Service - (WGMS). <http://www.geo.uzh.ch/microsite/wgms/>

Por otro lado cabe diferenciar los efectos de estos procesos en zonas montañosas de los producidos en zonas llanas, ya que los flujos en alta montaña son mucho más violentos, con velocidades mayores y un alto poder erosivo y destructivo. La formación de nuevas lagunas y el riesgo de inundación en caso de desborde son por lo tanto aspectos a considerar durante las próximas décadas o siglos, dado que la tendencia de los glaciares es a desaparecer en un mundo cada vez más cálido.

Otra seria consecuencia de la desaparición de los glaciares es su efecto sobre la estacionalidad de la escorrentía y aporte de agua a las zonas bajas de las cuencas. Durante la estación seca en Perú, la escorrentía de los ríos provenientes de los glaciares depende esencialmente del deshielo glaciar. Con áreas de glaciares en continuo retroceso, se ve amenazado el aporte de agua a la rica agricultura de la árida vertiente del Pacífico. La opción de reemplazar parte del almacenamiento estacional de los glaciares mediante el uso de las lagunas como embalses debe ser cuidadosamente analizada. Se deberán verificar aspectos como la seguridad de la población aguas abajo tomando, para lo cual hacer análisis de riesgos adecuados.

Además, con el uso de las lagunas como embalses, la producción hidroeléctrica en nuevas lagunas puede ser interesante y debe ser evaluada bajo consideraciones de costo/beneficio económico, aspectos sociales y el uso múltiple del agua. Recientes conflictos sociales en relación al uso y manejo del agua en la Cordillera Blanca han mostrado la complejidad del asunto.

La topografía de alta montaña característica de las cordilleras peruanas es un factor de influencia sobre estas consideraciones. Los nevados más altos situados por encima de los 5 000 m.s.n.m., suelen tener una topografía caracterizada por fuertes pendientes con glaciares colgantes que contienen rocas permanentemente congeladas (permafrost) con temperaturas cerca de 0°C. El incremento continuo de temperatura, sumado a la pérdida de hielo superficial y de capas más profundas reducirá la estabilidad de estas vertientes escarpadas y congeladas; incrementando la probabilidad de grandes avalanchas de hielo y rocas.

Las lagunas existen o se forman al pie de los grandes nevados, en las zonas de menor pendiente, donde las lenguas glaciares se funden. Las lagunas se pueden formar detrás de las morrenas o en depresiones del lecho rocoso. Los valles bajo las lagunas o morrenas son a menudo poco inclinados o en ocasiones incluso escalonados, intercalando partes muy llanas (llanuras de inundación, otras lagunas, etc.) con partes de mayores pendientes; aunque también pueden ser quebradas angostas. Como consecuencia de esta topografía, el potencial hidroenergético de estas lagunas o cadenas de lagunas es elevado.

Por otro lado, los procesos relacionados con el desborde de las lagunas pueden iniciar una compleja cadena de procesos (avalancha, ola de impacto, rotura de la morrena por desbordamiento, inundación por rotura de las paredes del lago, desbordamiento de ríos, rotura de presas, erosiones devastadoras, etc.) que dé lugar a eventos de carácter extremo en cuanto a volúmenes, alcances y daños. Una topografía escalonada en varios niveles puede ofrecer, sin embargo, posibilidades para la reducción de riesgos y laminación de avenidas.

3. Desarrollo de proyectos multipropósito

3.1 Tipología de presas

Las presas se clasifican según el tipo de estructura y los materiales que la componen. Las presas de elementos naturales pueden ser de piedra o de tierra, mientras que las presas de hormigón suelen ser de gravedad, de bóveda o de contrafuertes.

Las presas realizadas con elementos naturales necesitan una transformación mínima de los materiales primarios disponibles, que se encuentran generalmente en los alrededores de la zona donde se quiere construir la presa. En este tipo de presas, y debido a la necesidad de estabilidad, la base suele ser muy ancha en comparación con su altura.

Por otro lado, las filtraciones que se pueden producir en la propia presa pueden reducirse o incluso eliminarse con la utilización de recubrimientos impermeables) en el núcleo de la misma.⁵ Esta impermeabilización debe de extenderse en profundidad con una excavación para evitar filtraciones por debajo de la presa.

Respecto a las presas de hormigón:

Las presas de gravedad son estructuras triangulares, con una base ancha que se va estrechando hacia la parte superior y teniendo la cara situada en la parte del embalse con una inclinación prácticamente vertical. Al igual que las presas realizadas con materiales naturales, su estabilidad se basa en su propio peso, por lo que no requieren un gran mantenimiento posterior. Es conveniente mencionar que, desde el punto de vista económico, un embalse construido en lagunas peruanas seguras de origen glaciar cuesta entre 3 y 10 centavos de dólar por metro cúbico almacenado. Esto contrasta con los métodos tradicionales de construcción de embalses en zonas llanas, donde prácticamente se construye el vaso del embalse con un costo de 1 a 1.5 dólares por metro cúbico almacenado.

Como ejemplos de este tipo tenemos el caso de la laguna Parón y muchas otras lagunas en las cuencas de los ríos Mantaro (Junín) y San Gabán (Puno). Todos estos embalses han sido construidos por empresas de electricidad. Sin embargo, el agua regulada también sirve para otras actividades como la agricultura o el agua potable.

La mayor parte de las presas que se han construido son de tierra con núcleos impermeables, para evitar las filtraciones y revestimiento de enrocados. Al mismo tiempo hay que destacar que la mayor parte de estas presas se clasifican como presas pequeñas.

Las presas de bóveda presentan una curvatura con la parte convexa situada en el embalse para poder distribuir la carga a través de toda la presa hasta los extremos, que tienen que tener una muy buena cimentación. La ventaja de este tipo de presas es que la cantidad de material necesario es más pequeña que en las presas de gravedad, aunque las condiciones exigidas del terreno son más estrictas y no se pueden realizar en todos los emplazamientos posibles.

Las presas de contrafuertes son una versión aligerada de las presas de gravedad, con una pared (curva o plana) almacenando el agua del embalse y con pilares o contrafuertes

⁵ Estos recubrimientos pueden ser a base de limos o arcillas, o incluso de geotextiles.

triangulares aguas abajo que sujetan la pared y transmiten la carga al terreno. A pesar de ello, no siempre son menos caras que las primeras, puesto que necesita una mayor cantidad de formas y acero de refuerzo. En casos con suelos inestables y que no soportan una gran cantidad de peso pueden ser una muy buena alternativa frente a las presas de gravedad.

3.2 Variedades de sustrato en cuencas de alta montaña

En las zonas de gran altitud de las cordilleras peruanas, el sustrato sobre el que se desarrollan los procesos geodinámicos y donde toda infraestructura debe ser construida se compone de:

- **Macizo rocoso (Ilustración 1, izquierda).** A menudo de tipo cristalino y pulido por la erosión glaciaria durante las épocas iniciales de mayores extensiones glaciares (Pequeña Edad de Hielo, Edades de Hielo), aunque algunas veces fracturados por una erosión fluvial más reciente. Ejemplos de este tipo se pueden encontrar en la Laguna 513 y en Arhuaycocha⁶. La permeabilidad depende del grado de fracturación de la roca, siendo mayor a medida que aumenta el número de fisuras y sus dimensiones. Por otro lado, debido a las pendientes pronunciadas que caracterizan estas regiones, la escorrentía suele ser elevada. La erosión de este tipo de suelos es lenta y principalmente causada por movimientos de masas de hielo y nieve.
- **Morrenas no consolidadas o débilmente consolidadas (Ilustración 1, derecha).** Formadas por material de diversas dimensiones que incluye desde arenas hasta grandes bloques. Un ejemplo son las grandes morrenas que circundan las Lagunas Palcacocha y Llaca⁷. La permeabilidad de estos suelos depende principalmente del grado de fracturación y porosidad de los materiales. Además, la escorrentía es elevada al tener pendientes pronunciadas. La erosión de estos suelos es lenta debido al gran tamaño de los materiales que lo componen, aunque sí se puede producir un lavado de los materiales más finos por caudales de escorrentía.
- **Gravas fluviales, a menudo mezcladas con sedimentos de grano fino procedentes de las lagunas (Ilustración 2, izquierda).** Estas se encuentran en los fondos planos de los valles. La Pampa Shonquil y la Laguna Jatuncocha son dos claros ejemplos, aunque con características diferentes. La Pampa Shonquil se encuentra al pie de la Laguna 513 y tiene una longitud menor a un kilómetro, mientras que la planicie aguas arriba de Jatuncocha tiene más de 4.5 km y un ancho mayor. Salvo en el caso en el que los sedimentos provengan únicamente de las lagunas, la permeabilidad de este tipo de suelos es elevada dado el alto grado de fracturación, lo que junto con pendientes más suaves, hace también disminuir la escorrentía. El menor tamaño de estos materiales favorece la erosión del suelo principalmente ocasionada por ríos.
- **Materiales de diverso tamaño procedentes de gelifración (Ilustración 2, derecha) con bordes afilados, con o sin transporte supraglacial.** Un claro ejemplo es el dique situado en la laguna Parón. La permeabilidad en estos suelos es heterogénea, pero

⁶ Laguna ubicada en la provincia de Huaylas, departamento de Ancash.

⁷ Ambas lagunas se ubican en la provincia de Huaylas, departamento de Ancash.

generalmente elevada, al menos en zonas de fuertes pendientes. La escorrentía depende de la inclinación del terreno.

- **Depósitos procedentes de flujos de escombros (debris flows).** No clasificados y escasamente consolidados con características similares a las morrenas, de las que a menudo proceden. Existen numerosos ejemplos en las laderas del Valle del Río Santa y sus afluentes.



Ilustración 1: Macizo rocoso en Laguna 513 (izquierda; Foto WH, Julio 2010) y gran morrena en Laguna Palcacocha (con brecha producida por el sobrevuerto de 1941, derecha; Foto WH, Enero 2011)



Ilustración 2: Depósitos fluviales y sedimentos de lago en Pampa Shonquil (izquierda, con flujo de escombros del evento del 2010, Foto WH, Julio 2010) y umbral de morrena / escombros en Laguna Parón (derecha, Foto WH, Junio 2009).

Las propiedades geotécnicas (esfuerzos de tracción/cortante/compresión, permeabilidad hidráulica, etc.) de estos tipos de sustratos representan algunos de los principales condicionantes para el diseño de las cimentaciones para las instalaciones previstas y deben, por tanto, ser cuidadosamente estudiados por medio de minuciosas campañas geológicas y geotécnicas (prospecciones geofísicas, sondeos para grandes infraestructuras, etc.). Tales estudios deben también analizar la idoneidad de los suelos para su utilización como materiales de construcción. Por ejemplo, las gravas y arenas pueden ser adecuadas para la producción de hormigón; por otro lado, las arcillas y limos son materiales impermeables y, en función de su disponibilidad y su idoneidad, podrían constituir el núcleo impermeable de una presa de materiales sueltos.

3.3 Hidrología

La hidrología se encarga de estudiar la distribución espacio-temporal del agua desde su creación en la atmosfera (lluvia) hasta su propagación en ríos, teniendo en cuenta todos los procesos existentes como la humedad y saturación del suelo, la evapotranspiración o el equilibrio de las masas glaciares.

La aplicación de un estudio hidrológico a una cuenca puede permitir estudiar la disponibilidad de agua y su distribución durante los periodos secos y húmedos, lo que resulta ser un estudio preliminar fundamental a la hora de construir un embalse.

Para dichos estudios, diversos datos iniciales son necesarios, tales como precipitación, temperatura, evapotranspiración potencial o medidas de caudales. Con ellos se puede calibrar y validar un modelo hidrológico que posteriormente nos permitirá simular y analizar diferentes escenarios futuros. En general los embalses tienen una vida útil de varios decenios y su servicio durante toda su vida útil tiene que ser verificado.

3.4 Construcción de presas

La creación de una presa implica diferentes tipos de estudios previos que dependen de los objetivos para los que ésta se crea. Los objetivos principales son generalmente:

- La producción de energía hidroeléctrica.
- El embalsamiento y regulación del agua para la agricultura.
- El consumo humano y la laminación de crecidas para la disminución de inundaciones aguas abajo.

También pueden existir otros objetivos como los ecológicos u otros relacionados con el turismo.

Actualmente, muchos de los proyectos de nueva construcción incluyen varios de estos objetivos y suelen llamarse proyectos multipropósito. El primer ejemplo de una obra multipropósito a nivel nacional es la Laguna Parón, donde se ha combinado seguridad y afianzamiento hídrico, pudiendo regular una cantidad de hasta 4 0 millones de m³ de agua.

Un segundo ejemplo es el de la laguna Sibinacocha⁸, cerca de la capa glaciar Quelccaya (Cusco), donde una presa de 8.40 m. de altura almacena 110 millones de m³ en una laguna con una longitud de 15 km.

Estos proyectos multipropósito suelen ser interesantes en zonas de alta montaña. Cuentan con un gran potencial para producir energía, pero también para ciertas necesidades básicas como la protección de la población contra avenidas⁹ o la mejora de la disponibilidad del recurso hídrico existente, principalmente para la agricultura.

En estos casos, el estudio de los recursos hídricos en la cuenca de interés es fundamental. El volumen de embalse que se crea tras la realización de una presa no es únicamente un parámetro de diseño, sino que se tiene que poder rellenar una vez terminada la presa. Para lograrlo, debe existir agua suficiente en la cuenca aguas arriba. Al mismo tiempo, esta agua tiene que ser utilizada para un objetivo concreto. Poder realizar un gran embalse y poder

⁸ Laguna de origen glaciar, ubicado en la provincia de Canchis, departamento de Cusco.

⁹ Avenida: Creciente impetuosa de un río o arroyo. (RAE)

llenarlo no quiere decir que todo el volumen de agua sea necesario. Quizás un embalse de dimensiones más pequeñas sea suficiente para los objetivos de las comunidades colindantes.

La magnitud de la obra es un tema sumamente importante para países en vías de desarrollo, ya que los problemas siempre se tienen que resolver de acuerdo a las posibilidades técnico-económicas disponibles. De otro modo, cuando se trata de proponer proyectos con procedimientos de países desarrollados, se comete lo que los canadienses denominan “escala tecnológica equivocada”. Esto se produce al efectuar proyectos extremadamente caros y sofisticados, que no son viables de acuerdo a los recursos disponibles e incluso que pueden no ser sostenibles a largo plazo.

Por lo tanto, los estudios de presas no solo se deben basar en estudios estructurales, sino también en los recursos técnico-económicos del país y en estudios de necesidades actuales y futuras del recurso hídrico.

En aquellos casos en los que la necesidad es únicamente de protección ante inundaciones, puede ser necesaria la construcción de diques de retención (ver Ilustración 3) cuya finalidad es la laminación de la avenida disminuyendo el caudal máximo de esta (además de su velocidad) y minimizando por tanto los daños causados por la avenida.

Además, estos diques tienen la capacidad de retener los materiales (sedimentos, vegetación, etc.) transportados por la avenida que por su volumen pueden causar daños a infraestructuras y poblaciones. Este tipo de ejemplos se han desarrollado bastante en cuencas cercanas a Lima como Chosica y Ayacucho y en cierta medida también cerca de Huaraz, en la zona de Rataquenua.

En función de las características de la cuenca, puede ser necesaria la construcción de varios diques a lo largo de los cauces por donde se estime que puede pasar la avenida. De esta manera se puede aumentar su eficacia.



Ilustración 3: Ejemplo de un dique de gaviones para la retención de sedimentos y laminación durante avenidas.

3.5 Planificación de una construcción y logística

Una vez definidos los objetivos de la construcción, es imprescindible la planificación de las obras y la correcta definición de toda la logística necesaria para su ejecución. Trabajos bien estructurados comportan una optimización del tiempo de la construcción y una minimización de los costes totales de la misma.

Los costos y los beneficios tienen que ser analizados también. Cuando hablamos de beneficios no debemos entender únicamente los económicos. También nos referimos a los beneficios sociales, como la mejora de la seguridad o del desarrollo sostenible de la región, disminución de las consecuencias de las sequías y por consiguiente de los recursos disponible para consumo propio, etc. También hay que tomar en cuenta los costos de mantenimiento de la construcción.

La planificación del proyecto tiene que tener en cuenta los recursos de trabajo disponibles en la región en términos de mano de obra y especialistas. Una buena planificación es fundamental para el éxito del proyecto. Debe contemplar los medios materiales y humanos para la construcción, los condicionantes técnicos propios del proyecto a construir (geología, topografía, hidrología, etc.), y aquellos condicionantes no técnicos que pueden afectar al desarrollo de la construcción. Por ejemplo, condicionantes climáticos que impidan el desarrollo de los trabajos durante determinadas épocas del año; o condicionantes de tipo social de la zona en la que se van a desarrollar los trabajos (costumbres, horarios laborales, vacaciones, fiestas locales, condiciones laborales, etc.).

La planificación debe contemplar también aspectos logísticos como el acceso a la zona de obra, el transporte de trabajadores a la obra (rutas) e instalaciones para el personal que trabaja en la construcción (comedores, vestuarios, aseos). En caso de que se encuentre lejos de un núcleo de población, se ha de considerar la necesidad de construir alojamientos para los trabajadores. En definitiva, una buena planificación detallada y minuciosa juega en favor de un desarrollo exitoso del proyecto, minimizando la aparición de imprevistos no deseados que pueden retrasar, encarecer y paralizar el proyecto.

Es importante en la fase de diseño definir con precisión los objetivos del proyecto para que se adapte a las necesidades que debe satisfacer y para conocer en la medida de lo posible todos los costos y todos los beneficios. También conviene valorar la viabilidad de las posibles alternativas. Por ejemplo, la construcción de grandes presas conlleva unos condicionantes económicos, ambientales, técnicos y sociales muy importantes. Las construcciones sin vías de acceso también conllevan una primera fase de creación de carreteras o caminos de acceso. Sin embargo, construcciones menores como diques de retención, como los descritos en el apartado anterior, pueden satisfacer las necesidades del proyecto con un menor costo material, menor impacto ambiental y son de más fácil ejecución.

Además, es esencial que los estudios de factibilidad y la planificación sean realizados de manera integral, con expertos de diferentes disciplinas que trabajen en colaboración. Por ejemplo, para fines de un análisis de costo-beneficio se requiere la colaboración de economistas con glaciólogos, hidrólogos, ingenieros civiles, profesionales de las ciencias sociales, etc.

3.6 Financiación

La financiación del proyecto puede determinar una parte de los objetivos del mismo. Por ejemplo, la realización de una presa con un único objetivo de producción hidroeléctrica, difícilmente será subvencionada por una agencia de cooperación o un organismo internacional. Sin embargo, un proyecto correctamente definido y con objetivos directamente relacionados con la calidad de vida de una región (disminución de riesgo de inundación y mejora de la disponibilidad del recurso hídrico) pueden ser un proyecto interesante para el gobierno regional o la comunidad internacional, especialmente cuando la metodología puede ser aplicable nuevamente a zonas similares con un costo inferior al primer proyecto.

3.7 Sociedad y proyectos de ingeniería multipropósito

Proyectos de pequeña, mediana o gran envergadura, como es el caso de los proyectos de ingeniería multipropósito, no deben pasar por alto aspectos determinantes y/o condicionantes que involucran directa o indirectamente a la sociedad donde un proyecto impactará. No considerar estos aspectos podrían determinar o incluso condicionar la puesta en marcha de cualquier proyecto.

En consecuencia, en el marco de proyectos de ingeniería multipropósito, es importante e ineludible contar con un panorama de la situación actual de las poblaciones involucradas y el contexto en términos sociales, culturales, políticos, económicos e incluso ambientales e

históricos. Este proceso permite identificar algunos aspectos que podrían decidir el rumbo de un proyecto.

El contexto, es el entorno en el cual una determinada población se encuentra, en un espacio y tiempo determinado. Se consideran diferentes niveles: local, distrital, provincial, nacional e incluso internacional. No importa si las poblaciones son grandes o pequeñas. Su sola consideración, en un sentido amplio, brinda elementos para la comprensión de fenómenos sociales, de realidades sociales específicas y la identificación de determinantes y/o condicionantes en un proyecto.

Por ejemplo, según el informe sobre conflictos sociales emitido por la Defensoría del Pueblo del Perú en el mes de Mayo del 2013, Ancash es el departamento con mayor número de conflictos sociales. Se registra que se presentaron 31 casos a esa oficina durante ese mes. Este dato no refiere necesariamente que todo el departamento es potencialmente conflictivo, sino más bien alerta la necesidad de una reflexión más detenida sobre el panorama y sobretodo el contexto social donde un proyecto impactará.

Estas consideraciones sugieren el trabajo conjunto entre las ciencias sociales y los proyectos de ingeniería multipropósito. De lo expuesto se deduce el tener en cuenta un enfoque transversal en los estudios y proyectos de este orden y en la necesidad de considerarlos desde el inicio hasta el final de un proyecto, e incluso después. Este enfoque, desde las ciencias sociales, propone además el uso de metodologías cualitativas que permitirán anticipar los aspectos determinantes y/o condicionantes presentes en un proyecto y contar con los impactos positivos e impactos adversos, anticipando el costo social o elevadas pérdidas económicas.

En definitiva, un adecuado estudio cualitativo con este enfoque transversal (el mismo que puede ser realizado en combinación con los conocidos estudios de impacto), debe tener en cuenta el panorama situacional y el contexto de una sociedad específica. Esto con el fin de permitir una adecuada caracterización y análisis de los aspectos determinantes y/o condicionantes presentes en un proyecto multipropósito. Además, este esfuerzo posibilita y adelanta insumos y argumentos útiles para los procesos de negociación entre los diferentes actores involucrados a diferentes niveles (local, provincial, etc.). También resulta útil para las estrategias de acción y comunicación en el marco de un proyecto multipropósito, pero sobretodo permiten un clima armónico y transparente al desarrollo del proyecto.

4. Posibles ejemplos preliminares de aplicación

Los siguientes ejemplos se sitúan en la Cordillera Blanca, en el departamento de Ancash. Estos casos conciernen estudios que han sido o son tratados recientemente.

4.1 *Lagunas Arhuaycocha y Artisón*

En la década de 1960 se construyó en el punto bajo de la Laguna Jatuncocha (8°55'45''S/77°39'30''), en la zona denominada Quebrada Honda o Quebrada de Santa Cruz. Una presa de materiales sueltos de 6 metros de altura y con un desagüe en su base

(Ilustración 4). Este dique funcionó correctamente como obra de retención de inundaciones y realmente contribuyó limitando, mas no evitando completamente los daños provocados por el desbordamiento de la Laguna Artisón baja en Febrero del año 2012.

El nivel de la Laguna Artisón era considerablemente mayor que hoy en día (Ilustración 5). El desbordamiento abrió una brecha en el dique de tierra y el nivel de agua en la laguna descendió bruscamente, provocando una gran avenida de agua y sedimentos (“debris flow”) que es reconocible en las imágenes de Google Earth de marzo del año 2012. Este suceso podría estar relacionado con la inestabilidad de la ladera derecha del valle (Ilustración 5).



Ilustración 4: Lagunas Artisón alta (a), Artisón baja (b), Arhuaycocha (c) y Jatuncocha (d); Google Earth 8/3/2012

De acuerdo a estudios de la UGRH, la Laguna Artisón alta, con un volumen de 1,4 millones de m³, está situada aguas arriba de Laguna Artisón baja, a poca distancia. Esta laguna posee un dique de roca sólido, pero está expuesta a potenciales avalanchas de hielo procedentes de las empinadas laderas glaciales, que pueden producir grandes olas de impacto en caso de caer sobre su superficie.

Dado que esta laguna tiene poco borde libre, un hipotético impacto podría crear una ola que se propagaría aguas abajo en el valle por las lagunas Artisón baja y Jatuncocha. Por otro lado, la laguna Artisón baja, por sí sola y por su pequeño volumen, ya no representa un riesgo mayor, aunque no se pueden descartar totalmente la ocurrencia de nuevos desbordes.

En el lado norte del Nevado Alpamayo, existen otras dos lagunas directamente expuestas a avalanchas de hielo desde las empinadas laderas glaciares. Una de estas lagunas, la laguna Arhuaycocha (8°53'15"S/77°37'30"W), tiene un volumen estimado de 19 millones de m³. La

desaparición del factor de estabilización que desempeña la lengua glaciaria todavía en contacto con el agua, podría provocar la caída de bloques de hielo sobre la laguna y crear olas de impacto con sus correspondientes avalanchas, que podrían alcanzar a la laguna Jatuncocha.

La laguna Arhuaycocha representa por lo tanto un riesgo alto, considerando su elevado volumen y sobre todo por la presencia de glaciares colgantes sobre su superficie. La obra ejecutada consistió en bajar el nivel de las aguas en 10 metros. Consideramos que debe complementarse con otras obras adicionales como un conducto cubierto y una presa de contención o dique de seguridad, al igual que ya se ha hecho en otras lagunas de la Cordillera Blanca.

Por otro lado, la construcción de la presa realizada en el año 1960 aguas abajo, hecha de materiales sueltos, ha demostrado ser una excelente medida de prevención reduciendo esencialmente los daños y riesgos relacionados con las infraestructuras y poblaciones de la parte baja de la subcuenca. Sin embargo, la reducción del riesgo por esta medida no es total y todavía la ocurrencia de eventos extremos puede representar una amenaza para estas zonas.

Sería de gran utilidad realizar una investigación más detallada de la situación, considerando construcciones adicionales para la protección frente a inundaciones; en posible conexión con desarrollos turísticos y de producción hidroeléctrica. Mientras tanto, un sistema de alerta temprana podría ayudar hasta la construcción de una obra de prevención definitiva.



Ilustración 5: Obra de desagüe del dique de tierra de la Laguna Jatuncocha (Foto izquierda: César Portocarrero) e inestabilidades de ladera y marcas del antiguo nivel de la Laguna Artisón baja (Foto derecha: César Portocarrero)

4.2 Lagunas Artesonraju/Parón

El nivel de agua en la Laguna Parón¹⁰ (8°59'20''S/77°39'40''W) está regulado desde el año 1970. Muchas pequeñas lagunas se han formado en la cuenca durante las décadas pasadas y una nueva laguna se formará en pocos años o décadas, debido al proceso de fusión y

¹⁰ La laguna Parón se ubica en la parte alta de la provincia de Caraz. Es una zona de importante actividad turística para excursión y escalada de nevados.

retroceso que experimenta la lengua del Glaciar Artesonraju. El volumen de esta nueva laguna podría ser de algunos millones de metros cúbicos.

Grandes avalanchas de hielo y roca procedentes, por ejemplo, del calentamiento del permafrost en la cumbre del Nevado Artesonraju, pueden alcanzar esta laguna en el futuro y causar olas de impacto que provoquen su desbordamiento. Las inundaciones provocadas por estos desbordamientos pueden ser retenidas en la Laguna Parón, siempre que se mantenga un adecuado resguardo. La laguna Parón es por tanto un ejemplo de éxito de un proyecto multipropósito (protección frente a inundaciones e hidroelectricidad), aunque en el pasado reciente ha sido conocido como un sitio de fuertes conflictos sociales (Carey et al. 2012b). La belleza única de la laguna en combinación con las existentes carreteras de acceso componen por si mismas un gran potencial turístico.

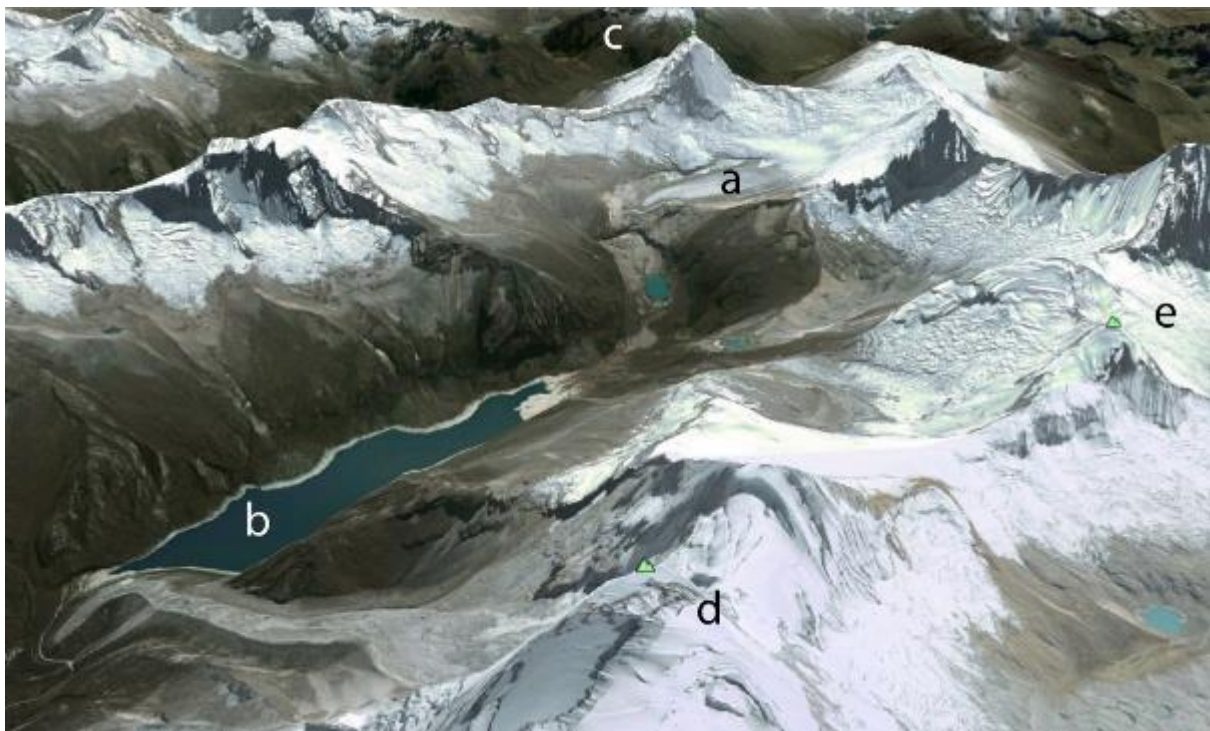


Ilustración 6: Glaciar Artesonraju (a), Laguna Parón (b), Cumbres de Artisón (c), Huandoy (d), y Pisco (e); Google Earth 8/3/2012

4.3 Laguna 513/ Pampa de Shonquil

La Laguna 513 se encuentra situada en la base del Nevado Hualcán ($9^{\circ}12'45''S/77^{\circ}33'00''W$) en la provincia de Carhuaz, Ancash. Comenzó su formación en la década de 1980. Por medio de túneles en el macizo rocoso, el nivel del lago se bajó artificialmente unos 20 metros respecto a su cota natural a comienzos de la década de 1990, como una medida de prevención contra las olas de impacto provocadas por avalanchas de hielo.

El retroceso glaciar en el caso particular de la laguna 513 ha creado un nuevo escenario en el que la cuenca se encuentra amenazada por potenciales desprendimientos de bloques de hielo y roca que pueden provocar el desbordamiento de la laguna y crear una inundación aguas abajo afectando a la población de Carhuaz, entre otras.

Una prueba del riesgo existente es el evento ocurrido el 11 de Abril del año 2010, cuando avalanchas de hielo y roca procedentes de los glaciares colgantes (por el calentamiento del permafrost del Nevado Hualcán), desencadenaron una ola en la superficie de la laguna que sobrepasó los 20 metros de resguardo. Esto inició una cadena de procesos (desborde, erosión e inundaciones) con daños en la toma de agua situada en la Pampa Shonquil (Ilustración 8), a lo largo del río Chucchún y la ciudad de Carhuaz

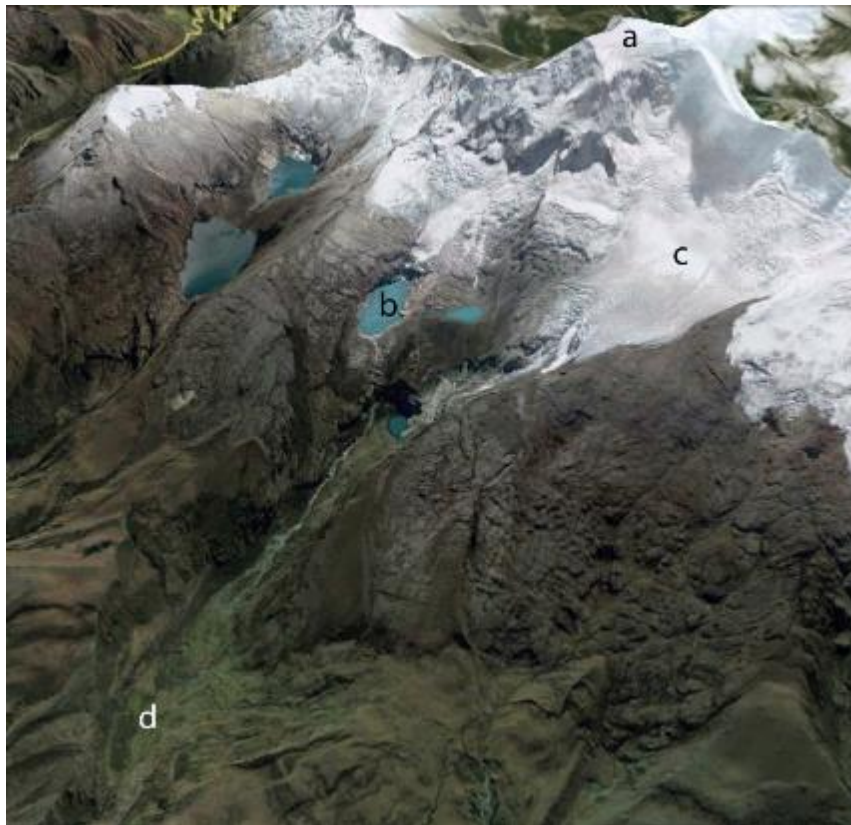


Ilustración 7: Nevado Hualcán (a), Laguna 513 (b), glaciar Rajupaquinan (c), y Pampa de Shonquil (d); Google Earth 7/16/2003

Un nuevo desborde de la Laguna 513 puede afectar las infraestructuras existentes, tales como tomas de agua y conducciones, caminos, carreteras, puentes, zonas de regadío, y poblaciones situadas aguas abajo de la laguna.

En este sentido, actualmente se está trabajando en la instalación y calibración de un Sistema de Alerta Temprana (SAT). Además, se han realizado distintas simulaciones que aportan una primera estimación de las dimensiones del fenómeno y permiten identificar las zonas más afectadas, definiendo un mapa de riesgos.

Se ha trabajado también en un estudio de obras de protección frente a avalanchas o inundaciones, como puede ser la construcción de un dique en la zona baja de la Pampa Shonquil, y una propuesta de protección de la toma de agua potable de Carhuaz

(EPFL/CREALP 2013)¹¹. Esta alternativa representa una solución a largo plazo frente a los riesgos de avalanchas e inundaciones, y mejoraría además otros aspectos como el aumento de la capacidad de suministro de agua potable. Esta medida ayudaría a proteger el empinado lecho del río Chucchún de altas escorrentías causadas por abundantes precipitaciones o desbordamientos de otras lagunas que pudieran formarse en el futuro (c en Ilustración 79).



Ilustración 8: Vista de la captación durante la avenida del año 2010. Imagen facilitada por Sr. Luis Mesa de la Municipalidad de Carhuaz.

El emplazamiento de la Laguna 513, a gran altura y con fuertes desniveles, hace aconsejable el planteamiento de estudios de viabilidad para el aprovechamiento hidroeléctrico. Además, la morfología del entorno parece favorecer la implantación de sistemas hidroeléctricos con un impacto ambiental mínimo. La instalación de la central, conducción forzada, y demás equipos se puede realizar en el interior del macizo rocoso, minimizando así el impacto visual y ambiental de la zona. Además, el caudal turbinado procedente de la Laguna 513, juega un papel en favor de la reducción del riesgo de desbordamiento puesto que disminuye el nivel de agua en la laguna.

Por otro lado, considerando un proyecto multipropósito, es conveniente mencionar que la demanda de recursos hídricos en la subcuenca Chucchún ha puesto de manifiesto la necesidad de construir un embalse de regulación. Hasta la fecha, el uso de aguas se produce únicamente con los caudales naturales. Sin embargo, se manifiesta la posibilidad de un conflicto por uso de aguas entre los agricultores y el servicio de agua potable de la ciudad de Carhuaz. Otro túnel, 20 o 30 metros más abajo del actual, supondría el almacenamiento de uno o varios millones de metros cúbicos y la utilización de toda el agua restante de manera

¹¹ El documento se llama: “Recomendaciones para la protección de la toma de agua de Carhuaz (Ancash)” y es parte de esta colección de documentos del proyecto Glaciares.

continua. Además, y de suma importancia, el túnel contribuiría en la disminución del riesgo de desbordamiento de la laguna.

La combinación de funciones: retención de inundaciones, suministro de agua y tal vez producción energética, requeriría en todo caso un esquema operativo apropiado para un desarrollado durable.

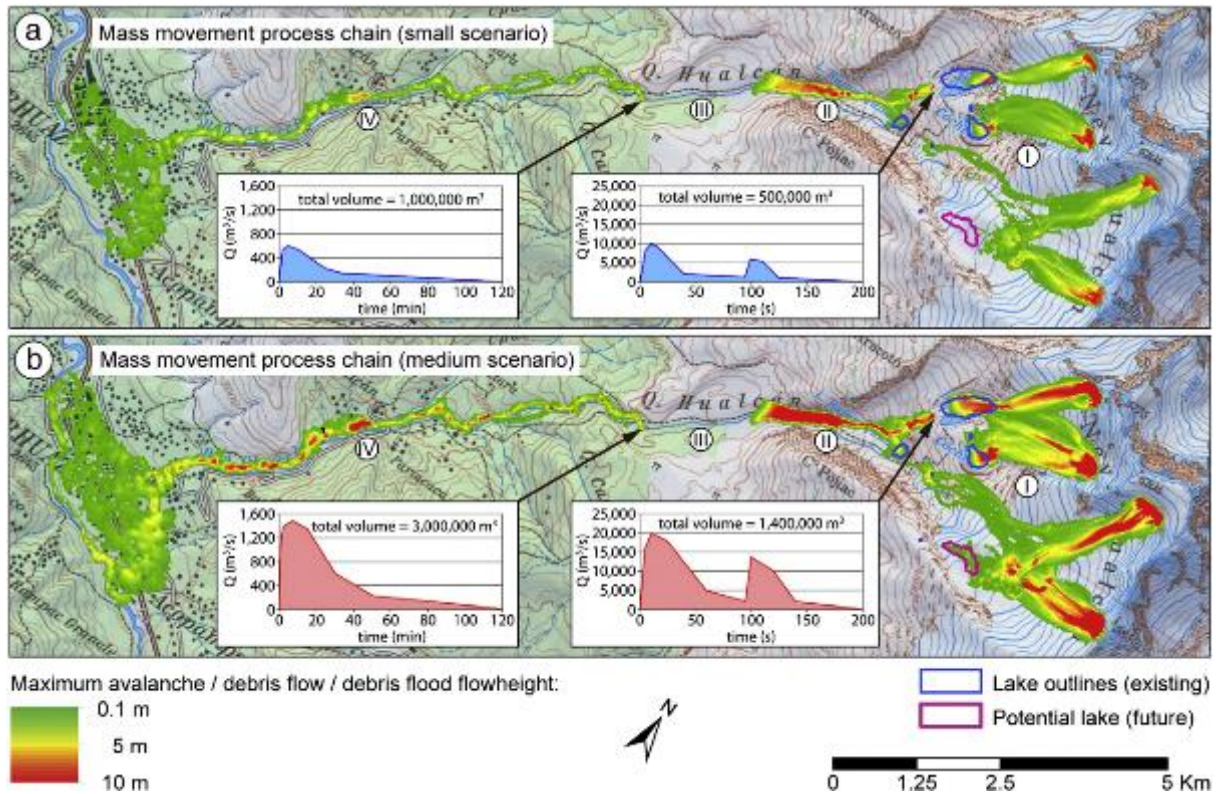


Ilustración 9: Simulación numérica de los procesos en cadena iniciados por posibles avalanchas de hielo y roca desde el Nevado Hualcán sobre la Laguna 513, produciendo inundaciones, erosión y deslizamientos de ladera aguas abajo del valle principal y la población de Carhuaz, Cordillera Blanca, Andes de Perú. I = avalancha de hielo-roca, II = desbordamiento del lago e inundación, III = inundación con flujo hiperconcentrado, IV = avalancha de agua y lodo. Las simulaciones fueron realizadas con el modelo numérico RAMMS, que consiste en un modelo bidimensional para la simulación de movimientos en masa. De Haeberli (2013); Cálculo y gráficos por Demian Schneider, Universidad de Zurich (cf. Carey et al., 2012a; Huggel et al., 2012 para más información sobre el caso y consideraciones de seguridad).

4.4 Laguna Palcacocha

El desbordamiento del dique formado por la morrena en la Laguna Palcacocha ($9^{\circ}23'40''S/77^{\circ}22'40''$) que ocurrió en el año 1941, provocó enormes daños y la muerte de miles de personas en el centro de Huaraz, la capital del departamento de Ancash. Este evento es históricamente el desastre más devastador relacionado con el retroceso glaciar y el desbordamiento de lagunas. La formación de una profunda brecha en la enorme morrena (Ilustración 1, derecha) redujo considerablemente el nivel de la laguna original y dos estructuras de desagüe (Ilustración 10) fueron construidas como medidas de seguridad. Estas medidas crearon un resguardo de seguridad de varios metros frente a posibles olas de

impacto. Uno de los desagües fue dañado hace unos pocos años por el impacto de una ola creada por una inestabilidad de la morrena de la zona izquierda, de la antigua lengua glaciar.

Con el continuo retroceso y desaparición de esta lengua glaciar plana que cubría los escombros glaciares, el lago crece en dirección a las empinadas laderas rocosas, lo que incrementa la posibilidad de que avalanchas de hielo y roca caigan directamente sobre la laguna cuyo volumen es mucho mayor que en el año 1941. Como consecuencia de esta modificación de las amenazas, se están tomando medidas para bajar el nivel de la laguna e incrementar el borde libre.



Ilustración 10: Laguna Palcacocha (Foto WH, Enero 2011)

Las trazas geomorfológicas en un corte en profundidad, indican que los escombros gruesos procedentes de la rotura de la morrena en el año 1941 fueron depositados en el fondo llano del valle inmediatamente bajo la brecha. Además, indica que la onda de la avenida comenzó a erosionar los laterales del valle por su mayor capacidad erosiva, probablemente transformada en una masa de movimiento rápido o un flujo hiperconcentrado. El principal flujo de escombros (debris flow) que causó el daño en la ciudad de Huaraz, fue previsiblemente originado en las secciones de mayor pendiente del río bajo la Quebrada y sobre la ciudad, después de otro desborde de una laguna temporal en el trayecto del flujo.

La topografía relativamente plana de la Quebrada Palcacocha ofrece posibilidades para la retención o laminación de inundaciones en varios lugares. Tal estructura no solo mejoraría la protección contra las consecuencias de grandes olas de impacto en la laguna Palcacocha, sino también serviría como retención de inundaciones con respecto a otras múltiples

lagunas ubicadas en la zona alta de la margen derecha del valle. Estas lagunas están también expuestas a avalanchas de hielo y roca y podrían producir las correspondientes olas de impacto e inundaciones (Ilustración 11). El posible uso de estas lagunas como reservas para irrigación, generación hidroeléctrica y su potencial desarrollo turístico ha de ser analizado en detalle, pues puede ofrecer una solución al problema.

Actualmente se llevan a cabo en Palcacocha unos trabajos temporales para mejorar la seguridad en la laguna. El proceso de sifonaje¹² actualmente ejecutado tiene un coste de unos 800 mil dólares y se realiza a la espera del inicio de la obra integral. Esta obra integral implicará un desagüe parcial, la construcción de un conducto de concreto armado y la restitución de un dique de seguridad de al menos 15 metros de altura. En el año 2010, la obra fue presupuestada en aproximadamente 5 millones de dólares.

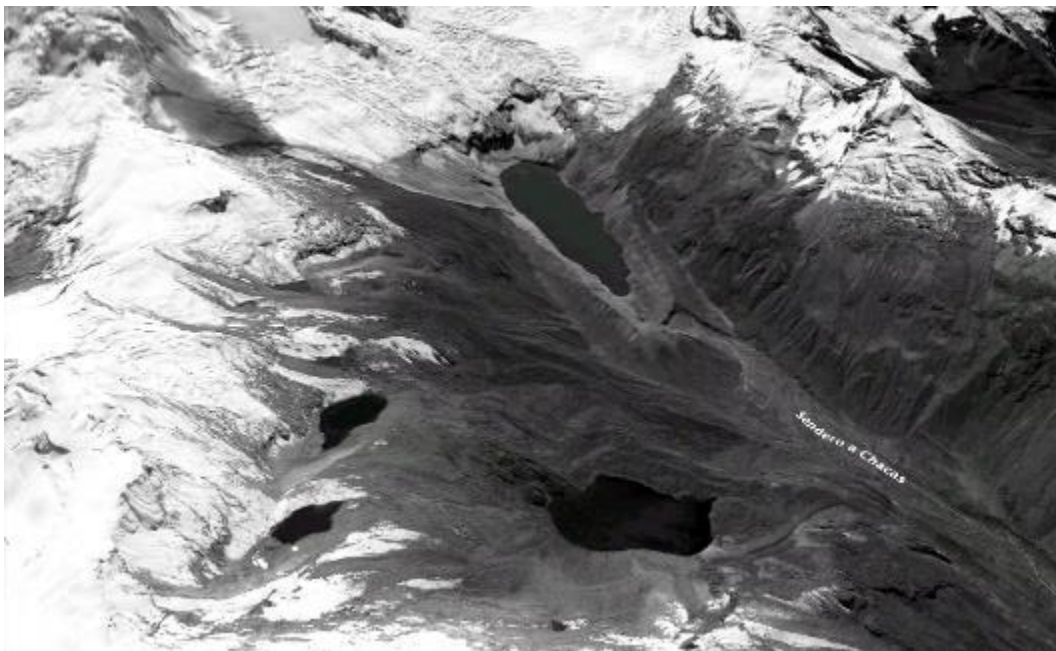


Ilustración 11: *Laguna Palcacocha (centro arriba) y otras lagunas de alta montaña más pequeñas, expuestas a avalanchas de hielo y roca; Google Earth 7/21/12*

4.5 Análisis detallados y enfoque de los posibles proyectos

Una vez conocidos algunos casos de retroceso glaciar y sus consecuencias, se detallan a continuación los distintos aspectos a analizar y los criterios a seguir para poder hacer frente a la nueva situación e intentar obtener, en la medida de lo posible, algún beneficio en forma de desarrollo económico para la región.

Para conocer el problema en profundidad y poder definir una serie de actuaciones contra los riesgos de desbordamiento e inundación, se ha de examinar el fenómeno considerando los siguientes aspectos:

¹² Sifonaje: Proceso de extracción de líquido de una cavidad con un tubo, utilizando la presión atmosférica.

- Estudios cualitativos que permitan anticipar aspectos determinantes y/o condicionantes presentes en las poblaciones.
- Identificación y valoración de los riesgos potenciales sobre población, infraestructuras existentes, agricultura y otros recursos.
- Efectos sobre los recursos naturales disponibles.
- Balance de necesidades y recursos disponibles en los nuevos escenarios.
- Aprovechamiento potencial de los nuevos recursos disponibles.
- Repercusión socio-económica en la región.
- Impacto medio-ambiental.

La metodología utilizada para minimizar los riesgos a la población e infraestructuras o instalaciones, está basada en los principios de prevención y protección. Se puede resumir en los siguientes puntos:

- Evaluar los riesgos, identificando potenciales desprendimientos o avalanchas y monitorearlos para controlar su evolución. Instalación de Sistemas de Alerta Temprana (SAT).
- Definir zonas de afectación en función del nivel de riesgo, mediante la elaboración de un mapa de amenazas y riesgos con la ayuda de simulaciones numéricas de inundaciones y flujos de escombros (debris flows).
- Establecer protocolos de actuación y evacuación ante riesgos eventuales, con el objetivo de minimizarlos.
- Estudiar la variación del nivel de la laguna con el fin de poder estimar un nivel máximo de seguridad ante una posible avalancha, mediante simulación con modelos numéricos.
- Estudiar la posible instalación de obras de protección que minimicen los riesgos en la población y las infraestructuras. Además, medir su eficacia (presas, diques, encauzamientos, muros, etc.)

Para evaluar los cambios en la hidrología de la cuenca, se debe realizar un estudio hidrológico general de la misma, identificando y cuantificando los nuevos recursos hídricos (oferta) y las necesidades hídricas de la población (agua potable, regadíos, industria, energía, etc.). Este análisis hidrológico permitirá determinar la existencia de déficits estacionales y las acciones a adoptar para poder suplirlos. Estas medidas se pueden dividir en dos grandes grupos:

- **Actuaciones sobre la demanda:** Estas medidas contemplan la optimización de los sistemas de abastecimiento con el objeto de aumentar su eficacia, disminuyendo el consumo final de agua. Entre estas medidas se contemplan:
 - La renovación de sistemas de abastecimiento de agua potable para la reducción de fugas.
 - La concienciación ciudadana ante un consumo responsable.

- Modernización de regadíos mediante el cambio de sistemas de inundación, por sistemas tecnificados.
- Renovación y mejora de las conducciones de agua de riego como impermeabilización de canales o entubamientos.
- “Re-estructuración” de los cultivos atendiendo a criterios de eficiencia.
- Otras
- **Actuaciones sobre la oferta:** Una vez definidos los déficits de la cuenca, se pueden plantear medidas que aumenten la oferta de agua disponible a fin de suplirlos completamente o reducirlos. Entre estas actuaciones se pueden plantear:
 - El aprovechamiento del agua almacenada en las lagunas durante épocas deficitarias para el abastecimiento de la población, regadíos o industrias. Esta medida favorece la prevención de riesgos de desbordamientos e inundaciones al disminuir el nivel de agua en la laguna.
 - La construcción de embalses que permitan almacenar agua durante la época de lluvias y aportarla en épocas de sequía. Esta medida está condicionada a la existencia, entre otros, de la topografía, geología, materiales y recursos económicos adecuados que hagan viable la construcción del embalse. Esta medida también favorece la disminución del riesgo de inundación y daños por el efecto laminador del embalse.
 - El aprovechamiento sostenible de recursos subterráneos de la cuenca mediante la extracción por pozos de bombeo. Esta medida debe ser considerada siempre que se garantice la renovación de los acuíferos y no suponga ningún riesgo ecológico.
 - Otras

El emplazamiento de estas lagunas, a gran altura y con fuertes desniveles, hace aconsejable el planteamiento de estudios de viabilidad para el aprovechamiento hidroeléctrico. Además, la morfología del entorno, generalmente, favorece la implantación de sistemas hidroeléctricos con un impacto ambiental mínimo. La instalación de la central hidroeléctrica, de la conducción forzada y demás equipos se puede realizar en el interior del macizo rocoso, minimizando así el impacto visual y ambiental de la zona. En algunos casos, puede no ser necesaria la construcción de presas para la creación de embalses, puesto que las propias lagunas tienen una capacidad de almacenamiento elevada y constituyen por sí mismas un vaso impermeable.

La producción hidroeléctrica puede aportar, dependiendo del modo de explotación del sistema, energía a las poblaciones de la cuenca o recursos económicos mediante su venta a la red de distribución.

El nuevo escenario de riesgo generado por estas lagunas hace necesario plantearse ciertos aspectos socio-económicos. Por ejemplo:

- La necesidad de implantar protocolos de actuación ante eventuales desbordamientos y riesgos de inundación.
- La definición de los medios humanos y materiales necesarios para una adecuada actuación frente a situaciones de riesgo.
- La necesidad de la concienciación ciudadana de los riesgos existentes mediante talleres o cursos de formación.

Todas las actuaciones planteadas en estos proyectos multipropósito deben tener en cuenta el alto valor medioambiental y cultural de la zona, así como prioridad su preservación, minimizando los posibles impactos medioambientales.

5. Próximos pasos y recomendaciones

Diversos principios para la protección contra inundaciones o aluviones han sido aplicados con éxito en las altas cordilleras de Perú. La evaluación de las actuaciones desde distintos puntos de vista, combinando las posibilidades de producción hidroeléctrica, abastecimiento de agua durante estaciones secas y durante la decreciente aportación de agua de origen glaciar así como los potenciales desarrollos turísticos, ayudan a justificar las altas inversiones que requieren las medidas contra inundaciones. Cabe mencionar que los eventos a controlar tienen bajas probabilidades de ocurrir aunque potencialmente pueden alcanzar grandes magnitudes. Por tanto, una planificación concreta debe estar basada en análisis sistemáticos sobre los riesgos y las necesidades.

La estimación de los riesgos y su análisis implica, además de los ya existentes inventarios de lagunas, la modelación espacial integral (basada en SIG) con primeras aproximaciones y cálculos de:

- Nuevas lagunas que se formen probablemente en el futuro. Un ejemplo es la laguna que comienza a formarse en la lengua del Glaciar Artesonraju.
- Laderas de alta montaña con combinaciones críticas de fuertes pendientes, cobertura de hielo, calentamiento del permafrost y falta de sustento estático por el glaciar que ha retrocedido.
- Posible distancia de las trayectorias de avalanchas de hielo y roca desde las laderas en relación a las lagunas existentes.
- Posible distancia de las avalanchas de agua y lodo originadas por olas de impacto provocadas por avalanchas de hielo y roca sobre lagunas.
- Daños potenciales en las zonas de impacto donde caen estas avalanchas.

Se debería considerar por tanto que los sistemas complejos de lagunas y posibles reacciones en cadena deben ser gestionados y controlados mediante conceptos y visiones integrales (ver Haeberli et al. 2001 para un ejemplo de los Alpes suizos).

Tomando como base la información espacial, se pueden definir los puntos o casos de alto riesgo y las prioridades de intervención. Esto a su vez, permitirá realizar análisis enfocados y planificaciones de aquellos casos seleccionados como prioritarios.

Al mismo tiempo, deben ser evaluadas las necesidades primarias relativas a:

- Suministro de agua en estaciones secas con retroceso glaciar y disminución del aporte de agua de deshielo.
- Suministro hidroeléctrico a escala local a regional.
- Desarrollo turístico (protección del paisaje, parques naturales, etc.).

Con esta información adicional, puede comenzar la optimización del proyecto así como la planificación de la logística y los aspectos financieros. Dado que el tiempo necesario para la construcción de infraestructuras en condiciones de alta montaña es mayor que en condiciones normales, junto con otras dificultades logísticas, los estudios mencionados deberían considerarse lo antes posible.

6. Referencias

- Carey, M., French, A. and O'Brien, E. (2012a). *Unintended effects of technology on climate change adaptation: an historical analysis of water conflicts below Andean Glaciers*. *Journal of Historical Geography* 38, 181-191.
- Carey, M., Huggel, C., Bury, J., Portocarrero, C. and Haeberli, W. (2012b): *An integrated socio-environmental framework for glacier hazard management and climate change adaptation: lessons from Lake 513, Cordillera Blanca, Peru*. *Climatic Change* 112, 3, 733-767.
- EPFL/CREALP (2013): *Recomendaciones para la protección de la toma de agua de Carhuaz. Informe, Proyecto Glaciares– Adaptación al cambio climático y reducción de riesgos de desastres por desglaciación de los nevados andinos de Cusco Y Ancash en Perú*.
- Haeberli, W. (2013): *Mountain permafrost — research frontiers and a special long-term challenge*. *Cold Regions Science and Technology* (2013) doi.org/10.1016/j.coldregions.2013.02.004
- Haeberli, W., Huggel, C., Paul, F. and Zemp, M. (2013): *Glacial response to climate change*. In: Shroder, J. (Editor in Chief), James, L.A., Harden, C.P., Clague, J.J. (Eds.), *Treatise on Geomorphology*. Academic Press, San Diego, CA, vol. 13, *Geomorphology of Human Disturbances, Climate Change, and Natural Hazards*, pp. 152–175.
- Haeberli, W., Kääb, A., Vonder Mühll, D. and Teyssie, Ph. (2001): *Prevention of outburst floods from periglacial lakes at Grubengletscher, Valais, Swiss Alps*. *Journal of Glaciology*, 47/156, 111-122.
- Huggel, C., Cochachin, A., Frey, H., García, J., Giraldez, C., Gomez, J., Haeberli, W., Ludeña, S., Portocarrero, C., Price, K., Rohrer, M., Salzmann, N., Schleiss, A., Schneider, D. and Silvestre, E. (2012): *Integrated assessment of high mountain hazards, related risk reduction and climate change adaptation strategies in the Peruvian Cordilleras*. *International Disaster and Risk Conference, Davos 2012, Extended Abstracts*, 329–332.
- Linsbauer, A., Paul, F. and 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* 117, F03007, doi:10.1029/2011JF002313
- Rabatel, A. and 27 co-authors (2013): *Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change*. *The Cryosphere* 7, 81-102.
- Salzmann, N., Huggel, C., Rohrer, M., Silverio, W., Mark, B.G., Burns, P. and 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.
- WGMS (2008): *Global Glacier Changes: Facts and Figures* (Zemp, M., Roer, I., Kääb, A., Hoelzle, M., Paul, F. and Haeberli, W. eds.), UNEP, World Glacier Monitoring Service, University of Zurich, Switzerland.

7. Glosario

- Sistema de Alerta Temprana – SAT.
- Escorrentía.
- Avenida.
- Laminación.
- Permafrost.
- Embalse de regulación.
- Morfología y geomorfología.
- Flujo de escombros (debris flow).
- Sifonaje.